



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIERÍA  
INDUSTRIAL VALENCIA

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA**

**ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE  
ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO DEL  
MUNICIPIO ARAS DE LOS OLMOS CON  
GENERACIÓN DE HIDRÓGENO COMO  
VECTOR ENERGÉTICO**

AUTOR: JAIME JAVIER BADIA TEJERO

TUTOR: CARLOS ROLDÁN PORTA

**Curso Académico: 2020-21**

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

---

## **RESUMEN**

El presente trabajo consiste en el diseño, evaluación técnico-económica e impacto medioambiental de un sistema híbrido renovable para el abastecimiento energético de Ara de los Olmos. En este proyecto se empleará la energía solar fotovoltaica, y la tecnología del hidrógeno, concretamente la de la electrólisis para producir hidrógeno con el fin de emplearlo como un vector energético, y su almacenamiento en pilas de combustible. De esta manera, se estudiará la viabilidad de suministrar toda la energía necesaria mediante la generación de electricidad a través de recursos verdes. El estudio comienza analizando los patrones de consumo del municipio, su potencia requerida, y evaluando las fuentes energéticas del lugar. Una vez se obtienen los patrones de consumo, se procedió a recolectar los datos anuales de radiación solar para poder determinar el potencial de generación renovable, un análisis de mercado sobre las distintas tecnologías de generación solar tal como las de electrólisis, además de las pilas de combustible. Una vez se tuvieron todos estos datos, se hizo uso de la herramienta HOMER para evaluar la viabilidad técnico-económica de este sistema híbrido renovable y teniendo en cuenta la reducción de la huella de carbono mediante el uso de estas tecnologías.

Para el análisis de la instalación se tuvo en consideración la mano de obra, el coste de todos los equipos, además de los costes de operación y mantenimiento. Este proyecto fue analizado teniendo en cuenta la capacidad de cubrir toda la demanda con energía renovable provista por el sistema, determinando los tiempos del retorno de la inversión y la viabilidad económica.

**Palabras Clave:** Hidrógeno, Homer, Pila de combustible, sistema híbrido.

## **RESUM**

El present treball consisteix en el disseny, l'avaluació técnico-econòmica i l'impacte ambiental d'un sistema híbrid renovable per al subministrament energètic d'Ara de los Olmos. En aquest projecte s'utilitzarà l'energia solar fotovoltaica i la tecnologia d'hidrogen, concretament la de l'electròlisi per produir hidrogen per tal d'utilitzar-lo com a vector energètic, i el seu emmagatzematge en piles de combustible. D'aquesta manera, s'estudiarà la viabilitat de subministrar tota l'energia necessària a través de la generació d'electricitat a través de recursos verds. L'estudi comença analitzant els patrons de consum del municipi, la seva potència requerida, i avaluant les fonts d'energia del lloc. Un cop obtinguts els patrons de consum, es van recollir les dades anuals de radiació solar per determinar el potencial de generació renovable, una anàlisi de mercat sobre les diferents tecnologies de generació solar com l'electròlisi, a més de les piles de combustible. Una vegada disponibles totes aquestes dades, es va utilitzar l'eina HOMER per avaluar la viabilitat tecnicoeconòmica d'aquest sistema híbrid renovable i tenint en compte la reducció de la petjada de carboni mitjançant l'ús d'aquestes tecnologies.

Per a l'anàlisi de la instal·lació, es va tenir en compte el treball, el cost de tots els equips, així com els costos d'operació i manteniment. Aquest projecte es va analitzar tenint en compte la capacitat de cobrir tota la demanda amb energies renovables proporcionades pel sistema, determinant els temps de retorn de la inversió i la viabilitat econòmica.

Paraules clau: Hidrogen, Homer, Pila de combustible, sistema híbrid.

## **ABSTRACT**

The following project focuses on the design, technical-economic evaluation and carbon footprint from the development of a hybrid renewable system for the energy supply of Ara de los Olmos. The technical deployment relies upon PV energy, and more precisely Hydrogen technology to produce hydrogen thanks to water electrolysis with the means to serve as an energy carrier, store it in tanks and then use it with fuel cells. In this way, the feasibility of supplying all the necessary energy with the generation of electricity through green resources will be studied. This case study begins by tracking down all the energy consumption patterns of this municipality, its required power, thereby evaluating the different technologies that would be suitable for the project. Once all the consumption patterns were defined, the annual solar radiation data was gathered to determine the potential renewable generation, then a deep market analysis was done to analyse all the current technologies for PV technology and therefore for all hydrogen different technologies. Once all these data were available, HOMER tool was used to determine the technical-economical viability of this hybrid energy system, taking into account also the carbon footprint reduction through to its implementation from these technologies.

For this analysis, all the operating features, labor, the cost of all the equipment, as well as operation and maintenance were considered. This study was done taking into account the ability to cover all demand with renewable energy provided by the system, determining the times of the return on investment and economic viability.

Keywords: Hydrogen, Homer, Fuel cell, hybrid system.

## ÍNDICE

- Memoria
- Presupuesto

### ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	OBJETIVO DEL DOCUMENTO .....	14
1.1	Objetivo .....	14
2.	MARCO TEÓRICO .....	16
2.1.2	Energía fotovoltaica .....	17
2.2	Tipología de instalaciones.....	19
2.2.1	Instalaciones conectadas a la red.....	19
2.2.2	Instalación en modo isla (off-grid) .....	20
2.3	Generación distribuida .....	20
2.3.1	Microrredes .....	21
2.3.2	Sistemas híbridos de Energía renovable.....	21
2.4	Generador de Biogás .....	22
2.5	Hidrógeno .....	22
2.5.1	Economía del Hidrógeno en la UE .....	23
2.5.2	Oportunidad para España.....	23
2.5.3	Electrólisis.....	24
2.5.4	Electrolizadores .....	25
2.4.5	Pila de combustible de membrana polimérica (PEMFC).....	32
2.5.6	Tanque de almacenamiento .....	35
2.6	Homer .....	36
3.1	Ara de los Olmos.....	37
3.2	Demanda eléctrica.....	37
3.3	Caracterización del recurso solar.....	39
3.4	INSTALACIÓN SOLAR.....	39
3.4	PILA DE COMBUSTIBLE, ELECTROLIZADOR Y TANQUE DE HIDRÓGENO .....	41
3.6	Modelado del proyecto.....	42
	Normativa contemplada.....	42

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

---

Aclaraciones del autoconsumo eléctrico en España.....	43
Subvenciones.....	43
3.7 Inversor.....	45
3.7 Planta fotovoltaica.....	46
3.8 Análisis del caso de estudio .....	49
3.10 CONFIGURACIONES POSIBLES .....	50
Escenario 0: Situación actual .....	51
ESCENARIO 1: FOTOVOLTAICA Y VENTA A LA RED .....	53
ESCENARIO 2: FOTOVOLTAICA + HIDROGENO + VENTA.....	57
ESCENARIO 3: MODO ISLA.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Generación solar fotovoltaica en un escenario de desarrollo sostenible 2000-2030. Fuente: IEA.....	16
Ilustración 2: Curva I-V para diferentes irradiancias a 25°C. Fuente: Módulo Era Solar .....	18
Ilustración 3: Curva I-V para diferentes temperaturas a irradiancia constante de 1000W/m2. Fuente: Módulo Era Solar .....	18
Ilustración 4: Esquema de una instalación fotovoltaica conectada a la red. Fuente: Google.....	19
Ilustración 5: Esquema comparativo entre el sistema eléctrico actual y el futuro. Fuente: Enernews .....	21
Ilustración 6: Esquema representativo de los distintos modos de generación eléctrica. Fuente: google .....	22
Ilustración 7: Aplicaciones de la tecnología del hidrogeno. Fuente: Hoja de ruta del hidrogeno .....	24
Ilustración 8: esquema de funcionamiento y reacciones de diferentes tipos de electrolizador. Fuente: Naturgy .....	25
Ilustración 9: Esquemna de una celda de electrólisis alcalina. Fuente: Researchgate .....	26
Ilustración 10: esquema de un electrolizador monopolar. Fuente: Energiaquímica.net.....	26
Ilustración 11: esquema de un electrolizador bipolar. Fuente: energiaquimica.net .....	27
Ilustración 12: Costes de capital tecnología alcalina. Fuente: Study development of water electrolysis in the EU E4TECH .....	27
Ilustración 13: Evolución de la energía requerida para la producción de hidrogeno. Fuente: Study development of water electrolysis in the EU E4TECH.....	28
Ilustración 14: Celda de membrana polimérica. Fuente: Researchgate.com .....	29
Ilustración 15: Costes de capital tecnología polimérica. Fuente: Study development of water electrolysis in the EU E4TECH .....	30
Ilustración 16: Ilustración 13: Evolución de la energía requerida para la producción de hidrogeno. Fuente: Study development of water electrolysis in the EU E4TECH.....	30
Ilustración 17: Esquema de un electrolizador SOEC. Fuente: Kumar & Himabindu,2019 .....	31
Ilustración 18: Tabla resumen de las principales características .....	32
Ilustración 19: Curva característica tensión-densidad de corriente de una celda teniendo en cuenta las pérdidas. Fuente: energias-renovables.com.....	34
Ilustración 20: Stack de una pila de combustible. Fuente: Google .....	35
Ilustración 21: Formas de almacenamiento de hidrógeno. Fuente: NREL .....	36
Ilustración 22: Potencia demandada mensualmente. Fuente: elaboración propia .....	37
Ilustración 23: Evolución de la demanda energética diaria. Fuente: elaboración propia .....	38
Ilustración 24: Irradiación solar anual. Fuente: PVGIS .....	39
Ilustración 25: Evolución de los costes de instalación de módulos fotovoltaicos. Fuente: IDAE .....	40
Ilustración 26: Ayudas Ivace al Autoconsumo. Fuente: IVACE.....	44
Ilustración 27: Esquema de la metodología empleada. Fuente: elaboración propia.....	50
Ilustración 28: metodología de análisis aplicada por Homer. Fuente: elaboración propia .....	51
Ilustración 29: Esquema Homer de la configuración solar + red. Fuente: elaboración propia ....	53
Ilustración 30: distribución temporal de la producción fotovoltaica. Fuente: elaboración propia .....	54
Ilustración 31: Esquema eléctrico en Homer. Fuente: elaboración propia.....	58



Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

---

Ilustración 32: Producción de hidrógeno del electrolizador. Fuente: Elaboración propia.....	59
Ilustración 33: Previsión de costes de la electrólisis. Fuente: International journal of hydrogen energy .....	61
Ilustración 34: Previsión de la eficiencia de la electrólisis. Fuente: international journal of hydrogen energy .....	61
Ilustración 35: Previsión de la vida útil de los electrolizadores alcalinos. Fuente: international hydrogen of energy.....	62
Ilustración 36: Funcionamiento detallado de la configuración en modo isla. Fuente: elaboración propia .....	64
Ilustración 37: Nivel del tanque de hidrógeno.....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diagrama de funcionamiento de una celda de pila de combustible. Fuente: imágenes de google .....	33
Tabla 2: Demanda energética media diaria en agosto. Fuente: elaboración propia .....	39
Tabla 3: parámetros técnicos del módulo fotovoltaico 400W PERC monocristalino.....	40
Tabla 4: Tabla resumen de los costes de instalación fotovoltaicos. Fuente: elaboración propia	41
Tabla 5: Tabla resumen de los costes de instalación por kW. Fuente: elaboración propia. ....	41
Tabla 6: Resumen de costes del electrolizador y pila de combustible. Fuente: elaboración propia .....	42
Tabla 7: Costes aproximados del tanque de hidrógeno. Fuente: elaboración propia .....	42
Tabla 8: Presupuesto máximo orientativo. Fuente: elaboración propia.....	45
Tabla 9: Programa de incentivos. Fuente: elaboración propia .....	45
Tabla 10: Características del inversor. Fuente: elaboración propia .....	46
Tabla 11: Costes del inversor seleccionado. Fuente: elaboración propia .....	46
Tabla 12: Tarifa regulada 2.0A. Fuente: elaboración propia.....	52
Tabla 13: Análisis técnico de la instalación respecto a la producción energética.....	54
Tabla 14: parámetros técnicos de la instalación fotovoltaica. Fuente: elaboración propia .....	55
Tabla 15: Flujo de caja de la instalación para 25 años. Fuente: elaboración propia.....	56
Tabla 16: Parámetros económicos de la configuración 1. Fuente: elaboración propia .....	56
Tabla 17: comparativa entre el escenario actual, y la configuración de fotovoltaica. Fuente: elaboración propia.....	57
Tabla 18: comparación del impacto ambiental.....	57
Tabla 19: Análisis medioambiental. Fuente: elaboración propia.....	60
Tabla 20: costes unitarios del hidrógeno .....	62
Tabla 21: Producción y consumo energético en modo isla. Fuente: elaboración propia .....	63
Tabla 23: parámetros de funcionamiento de la instalación. Fuente: elaboración propia .....	64
Tabla 24: Flujo de caja para 25 años. Fuente: elaboración propia.....	66
Tabla 25: Coste de la electricidad y gastos anuales. Fuente: elaboración propia.....	66
Tabla 26: Resultados económicos de la configuración en modo isla. Fuente: elaboración propia .....	67
Tabla 27: Comparativa de costes entre los distintos escenarios. Fuente: elaboración propia.	67
Tabla 28: Emisiones de la configuración en modo isla. Fuente: elaboración propia .....	67

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Ecuación de la electrólisis del agua. Fuente: Elaboración propia .....	25
Ecuación 2: Reacción de la pila de combustible. Fuente: elaboración propia .....	33
Ecuación 3: Número de módulos a instalar. Fuente: elaboración propia .....	46
Ecuación 4: Tensión máxima de potencia que soporta el módulo. Fuente: elaboración propua .....	47
Ecuación 5: Restricciones del numero de módulos a instalar. Fuente: elaboración propia .....	48
Ecuación 6: Tensión mínima media del módulo. Fuente: elaboración propia .....	48
Ecuación 7: número de módulos en serie. Fuente: elaboración propia .....	48
Ecuación 8: Número de módulos en paralelo. Fuente: elaboración propia.....	48
Ecuación 9: Intensidad máxima de cortocircuito. Fuente: elaboración propia.....	48
Ecuación 10: Coste de la electricidad. Fuente: elaboración propia. ....	52

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

---

## **MEMORIA**

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

---

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1. OBJETIVO DEL DOCUMENTO**

#### **1.1 Objetivo**

El objetivo de este TFG consiste en el estudio de la viabilidad de abastecimiento energético mediante la generación de hidrógeno como un vector energético, mediante un huerto solar.

El hidrógeno es una de las tecnologías claves para poder acelerar la transición energética por eso mismo, resulta de gran interés explorar esta herramienta para asegurar una mejor implementación de las energías renovables en la red, o microrredes en modo isla.

Una vez analizadas las necesidades del proyecto, se propondrán tres escenarios distintos, en los que se propondrán tres alternativas distintas mediante el uso de distintas tecnologías para su implementación en el municipio de Aras de los Olmos, para esto se empleará Software Homer que permite la modelización de microrredes además y por lo tanto el estudio de viabilidad económica y ambiental.

#### **1.2 Motivación y justificación**

Desde la revolución industrial, el ser humano ha desarrollado una sociedad ligada al uso de los combustibles fósiles, que en la actualidad se manifiesta en un escenario de una demanda energética mundial creciente de manera desorbitada. Como consecuencia, este siglo está altamente ligado a la destrucción del planeta a causa de las acciones de los seres humanos, estos efectos se muestran cada vez de manera más evidente, ya sea por el aumento del nivel del mar, o la destrucción de los océanos.

Actualmente nos encontramos en un momento clave para la transición energética debido a los diversos tratados que se han firmado por parte de la mayoría de países como el de París en 2015, en el cual todas las naciones se comprometían a que la temperatura del globo no subiese más de dos grados para 2100. Concretamente, la Unión Europea se ha comprometido a ser climáticamente neutra para 2050.

Para poder alcanzar estos objetivos se debe de empezar a pensar en volver a redefinir el modelo energético actual pues se espera que la demanda energética mundial necesaria para 2050 alcance los 500 millones exajulios, de ahí nace la necesidad imperiosa de apostar por alternativas más amigables con el medioambiente.

Las energías renovables se definen como fuentes de energía limpias, basadas en el aprovechamiento de recursos energéticos inagotables como el sol, o indirectamente provocados por el sol. Dado su reducida huella de carbono, estas tecnologías juegan un papel crucial en revertir nuestro modelo energético. Por otra parte, el desarrollo de tecnologías como el hidrógeno, vector energético, permitirán acelerar esta transición energética, dado que las energías renovables por sí solas, no pueden sustituir a las fuentes fósiles.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

---

El panorama energético español, resulta muy esperanzador, debido al potencial energético del país a causa de sus horas de sol y viento, contamos ya con un 40% de la demanda eléctrica proveniente de fuentes renovables. De hecho España, es uno de los primeros países de Europa con mayor implementación de renovables, además de que el país se quiere posicionar como un referente en la transición energética a nivel europeo, teniendo uno de los mejores planes para esta transición a nivel de la unión.



## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Energía solar fotovoltaica

La energía solar, puede ser definida como una fuente de energía solar inagotable gracias a la radiación electromagnética procedente del sol. Durante las últimas décadas, los países desarrollados tanto como los de en vías de desarrollo han apostado fuertemente por el uso del recurso solar para generar electricidad. Concretamente a España llegan un promedio de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/año, una cifra muy superior a la del resto de Europa y que por ende sitúa a España como un país con gran capacidad de implementación de esta tecnología.

En la actualidad, el mercado de la energía solar esta en constante crecimiento en todo el mundo debido a la reducción de costes de esta tecnología, a precios mas competitivos. Dentro de este mercado, España representó el 90% de las instalaciones fotovoltaicas realizadas en la Unión Europea a lo largo del 2019.

Durante los próximos años, los mayores productores de energía fotovoltaica van a alcanzar la implementación de alrededor de 125GW anualmente durante los años 2021-2025, en un escenario dentro de un marco desarrollo sostenible, la siguiente figura muestra la evolución de la producción eléctrica a partir de este recurso solar. (IEA, 2020)

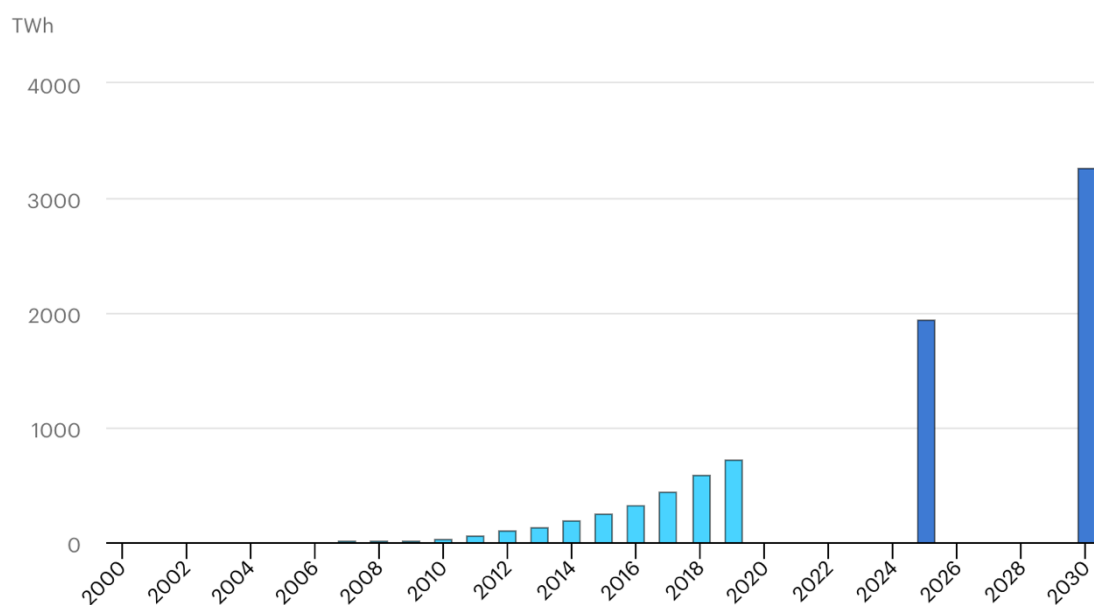


Ilustración 1: Generación solar fotovoltaica en un escenario de desarrollo sostenible 2000-2030. Fuente: IEA

### 2.1.2 Energía fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico generando electricidad mediante semiconductores dopados. Las células, están compuestas por silicio cristalino o policristalino, estas se encargan de convertir la energía solar en energía eléctrica. Cuando la radiación solar incide sobre la célula, los átomos del material absorben la energía provocando la salida de los electrones en la capa de valencia. De esta manera se genera un movimiento libre de electrones a través del material, aparece en el una tensión análoga a la que se produce entre las bornes de una pila.

En la actualidad, se comercializa más los módulos compuesto por células de silicio policristalino debido a coste de producción menor ya que está formado por un conjunto de estructuras microcristalinas. Además tienen un rendimiento muy parecido al de las estructuras de silicio cristalino, entorno a un 15-20%.

Los paneles solares o módulos fotovoltaicos, están formados por una red de células conectadas como circuito en serie para aumentar la tensión de salida hasta el valor óptimo. De la misma manera que se conectan varias redes como circuito paralelo para aumentar la intensidad de salida.

Para dimensionar una instalación fotovoltaica, es imprescindible conocer los parámetros eléctricos fundamentales de los módulos que están en el mercado. Estos parámetros son:

- Potencia pico: se define como la máxima potencia eléctrica que puede generar el módulo bajo las siguientes condiciones estándares de medida:
  - Irradiancia: 1000 W/m<sup>2</sup> (1 KW/m<sup>2</sup> ).
  - Distribución espectral de la radiación incidente: AM1.5 (masa de aire)
  - Incidencia normal.
  - Temperatura de la célula: 25 °C.
- Corriente de cortocircuito (ISC): es la máxima intensidad que se genera en el panel cuando no está conectada ninguna carga y se cortocircuitan sus bornes.
- Tensión de circuito abierto (VOC): es la máxima tensión que proporciona el panel cuando no hay conectada ninguna carga entre los bornes del panel y dichos bornes están al aire. • Punto de máxima potencia (Impp, Vmpp): es el punto para el cual la potencia entregada es máxima, obteniéndose el mayor rendimiento posible del panel.
- Factor de forma (FF): Es la relación entre la potencia máxima que el panel puede entregar y el producto de la corriente de máxima potencia (Impp) y la tensión de máxima potencia (Vmpp). Este parámetro sirve para conocer la curva característica I-V de los paneles.
- Eficiencia y rendimiento ( $\eta$ ): es el cociente entre la potencia máxima que el panel puede entregar y la potencia de la radiación solar incidente. Dependiendo de la tecnología utilizada a la hora de la fabricación del panel puede llegar hasta el 18%.

A la hora de elegir un módulo fotovoltaico, es muy importante prestar atención la curva “voltaje-corriente”. En esta, se recogen todos los parámetros de tensión y corriente para máxima potencia (Impp, Vmpp), tensión a circuito abierto (VOC) y corriente de cortocircuito (ISC) de un panel.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

En las siguientes gráficas, se puede observar las diferentes curvas de funcionamiento de una misma placa que se obtienen al ir variando la radiación incidente sobre la placa, en la primera gráfica, y la temperatura de la placa, en la segunda gráfica.

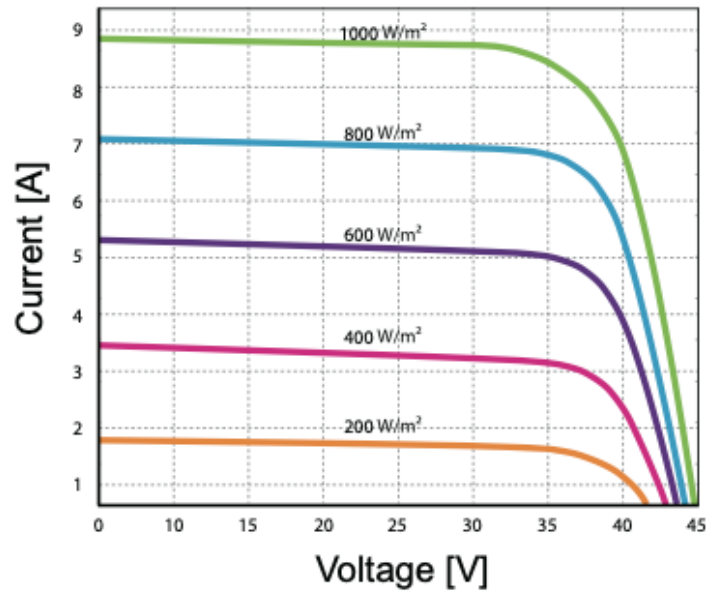


Ilustración 2: Curva I-V para diferentes irradiancias a 25°C. Fuente: Módulo Era Solar

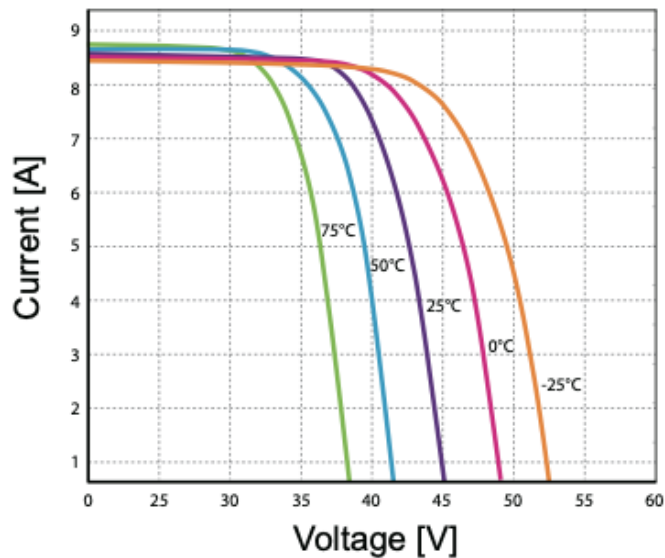


Ilustración 3: Curva I-V para diferentes temperaturas a irradiancia constante de 1000W/m2. Fuente: Módulo Era Solar

A la hora de proceder a la instalación de los módulos fotovoltaicos, se debe prestar una importante atención al sombreado.

Cuando una sombra es proyectada sobre una célula fotovoltaica, esta pasa de comportarse como un generador a como un diodo que impide la producción eléctrica al bloquear la corriente

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

generada por el resto de células del módulo. Como consecuencia, se pueden provocar sobrecalentamientos que dañen el módulo.

Para solucionar este problema, se suelen colocar diodos by-pass que detectan cuando una célula o un grupo de células funcionan de manera anormal, y son aisladas del resto, provocando una disminución de la capacidad de generación. Por este motivo, se debe evitar a toda costa la aparición de sombras sobre los módulos a la hora de dimensionar una instalación.

Es importante comentar que las plantas fotovoltaicas, presentan grandes ventajas frente a otros sistemas de generación debido a:

- Su fiabilidad a largo plazo con costes de generación reducidos.
- Energía totalmente limpia durante su vida útil.
- La capacidad de establecer redes de generación distribuida o autoconsumo, y así reducir las pérdidas debidas al transporte.

### 2.2 Tipología de instalaciones

#### 2.2.1 Instalaciones conectadas a la red

Este tipo de instalaciones se suelen llamar comúnmente huertos solares, de grandes dimensiones con el objetivo de producir potencias elevadas.

Para poder ejecutar este tipo de instalaciones, es necesario tener grandes extensiones de terreno, por lo que se suelen estar situadas lejos de los puntos de consumo que implica grandes pérdidas por transporte.

En la actualidad, gracias al desarrollo de las tecnologías renovables, especialmente la fotovoltaica, los costes han disminuido notablemente de forma que producir un kW sea equiparable al de una central térmica convencional. En la siguiente figura se muestra un esquema básico de este tipo de instalaciones.

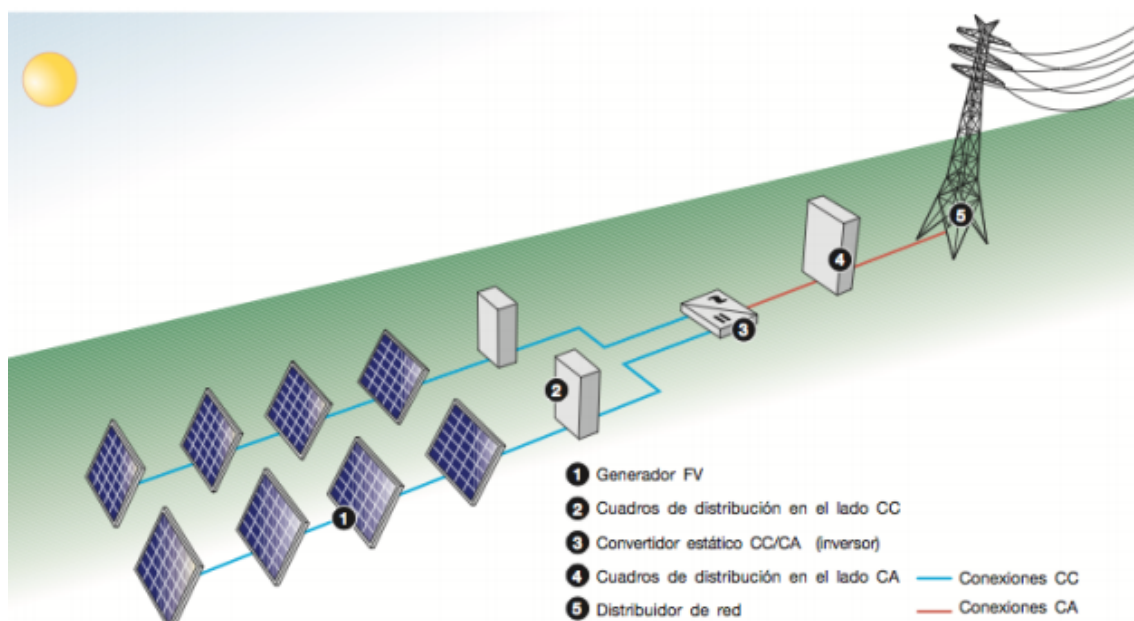


Ilustración 4: Esquema de una instalación fotovoltaica conectada a la red. Fuente: Google

### **2.2.2 Instalación en modo isla (off-grid)**

La generación eléctrica en modo isla se caracteriza por instalaciones que no están conectadas a la red. Por lo general, se suelen componer por placas solares y un sistema de almacenamiento energético que sea capaz de satisfacer la demanda en las horas donde no haya sol o la generación sea insuficiente.

Este tipo de instalaciones se suelen emplear en áreas geográficas donde el suministro eléctrico no es capaz de llegar o es de difícil acceso, que hacen que su suministro sea difícil o poco viable desde el punto de vista técnico económico.

Un problema asociado a la tipología de este tipo de instalaciones es la incapacidad de afrontar la variación de la demanda eléctrica, por este motivo es necesario que se doten de un elevado margen de reserva para que puedan asumir esas fluctuaciones.

Muchas veces es necesario combinarlo con un sistema de apoyo electrógeno.

### **2.2.3 Autoconsumo con conexión a la red eléctrica (on-grid)**

Las instalaciones conectadas a la red o también llamadas “on-grid”, son un tipo de instalaciones directamente conectadas a la red eléctrica. Estas instalaciones son comparables a una central eléctrica a pequeña escala, pues el productor está conectado a la red inyectando electricidad. Así mismo, se ha favorecido la expansión de la energía solar y otra renovables en el mundo.

Estas instalaciones están compuestas por un sistema de generación, comúnmente placas fotovoltaicas, sistema de almacenamiento (opcional) y la conexión a la red.

El autoconsumo se basa en que el productor es capaz de satisfacer parte de su demanda, y parte de la energía sobrante se inyecta a la red gracias a su instalación fotovoltaica, por ejemplo, si no se dispone de un sistema de almacenamiento.

Por otra parte, cuando el productor no es capaz de producir electricidad, es decir, cuando la demanda es superior a la generación, será la red quien suministre electricidad.

Es importante constatar que normalmente el productor recibe recompensas en su factura eléctrica mensual por inyectar energía a la red.

## **2.3 Generación distribuida**

La generación distribuida representa un cambio en el panorama energético actual respecto a la generación de energía centralizada. Se debe de constatar que aunque este parezca un concepto nuevo, en el origen de la industria eléctrica, esta se basaba en la generación de electricidad en el punto de consumo. Sin embargo, a medida que fueron aumentando las poblaciones, o por ejemplo las industrias, se fue avanzando a el esquema actual de generación centralizada.

Esta consiste en la producción de energía eléctrica por muchas pequeñas fuentes de carácter renovable, ya sean, módulos fotovoltaicos, celdas de combustible o aerogeneradores, por ejemplo. Donde se integran también sistemas de almacenamiento como el del hidrógeno.

## ¿Qué es la Generación Distribuida?

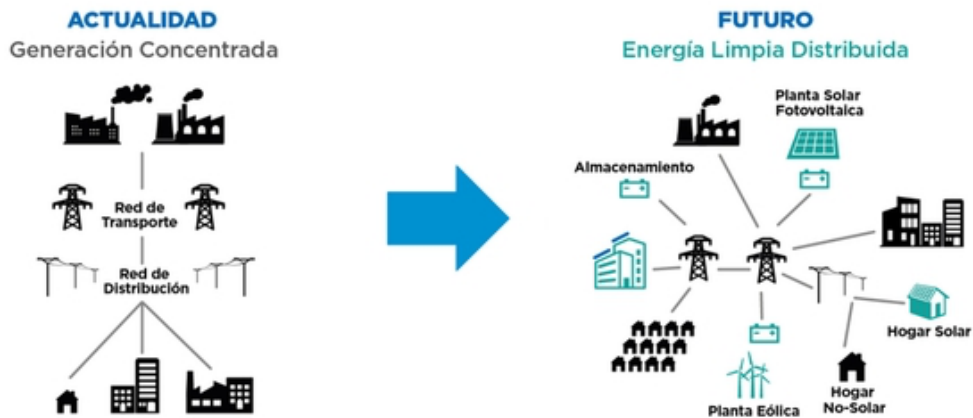


Ilustración 5: Esquema comparativo entre el sistema eléctrico actual y el futuro. Fuente: Enernews

### 2.3.1 Microrredes

Las microrredes se definen como un grupo de cargas interconectadas y fuentes de energía similares a centrales de pequeña o mediana escala que actúan como una unidad respecto a la red. Una microrred tiene la capacidad desconectarse y conectarse de la red, operando de esta forma en modo isla o península.

En las microrredes, interactúan un gran número de fuentes de energía, especialmente de carácter renovable para poder atender a la demanda local. Además no solo sirven para optimizar la generación de energía o llevarla a lugares de difícil acceso, sino que también son una pieza importante para poder alcanzar un futuro más sostenible, dado que permitirán reducir sustancialmente las emisiones de CO<sub>2</sub>, y que además permitirá aumentar la cuota de mercado de la generación renovable.

En la actualidad se está introduciendo el concepto de microrred inteligente dado que emplea las tecnologías digitales para distribuir la generación de manera bidireccional desde los proveedores hasta los consumidores.

### 2.3.2 Sistemas híbridos de Energía renovable

La combinación mediante la integración de las tecnologías GD en microrredes está permitiendo comenzar a cambiar el panorama actual de generación eléctrica. La implementación de pequeñas redes de generación, ayudará a que la sociedad deje de depender tanto en combustibles fósiles y por lo tanto su impacto se traducirá en una reducción sustancial de los gases de efecto invernadero. Por otra parte, permitirá contrarrestar la intermitencia inherente e incertidumbre de las fuentes de generación renovable.

El término Sistema híbrido de Energía Renovable (HRES) se define como un sistema que integra distintos tipos de generadores para alimentar la demanda de los usuarios. Un sistema híbrido puede basarse en la combinación de fuentes convencionales como los generadores de Diésel, y/o fuentes renovables como los paneles fotovoltaicos o aerogeneradores con fuentes de almacenamiento.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

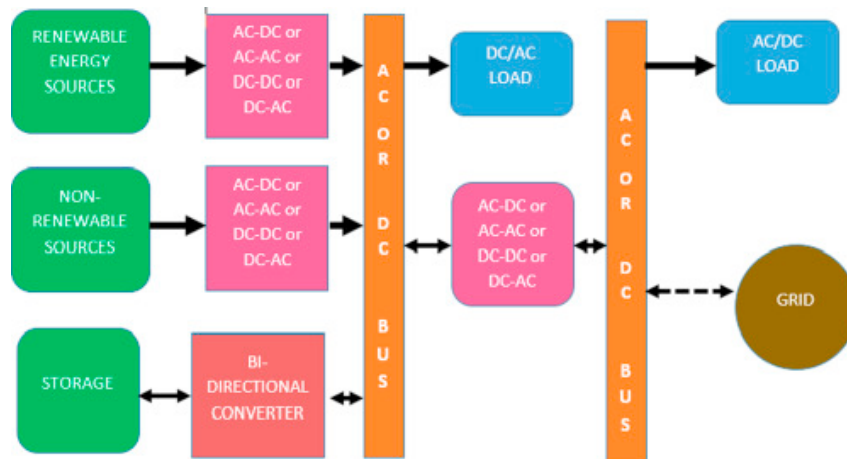


Ilustración 6: Esquema representativo de los distintos modos de generación eléctrica. Fuente: google

Para llevar a cabo este tipo de instalaciones, se requiere la recolección de datos por un largo periodo de tiempo, generalmente un año, sobre los recursos energéticos renovables en el emplazamiento del proyecto. En este caso de estudio, se necesitará saber la radiación solar y la demanda energética.

Por lo general, las variaciones de energía solar no coinciden con el tiempo de la demanda, por lo que esto resulta en la necesidad de un sobredimensionamiento del sistema que puede resultar costoso, además la intermitencia de los recursos renovables resulta en la necesidad de tener un sistema de almacenamiento energético.

### 2.4 Generador de Biogás

La generación de electricidad a partir de biogás se basa en la revalorización energética de residuos, mediante una digestión de residuos de manera anaeróbica en la que se produce gas metano en este proceso. (BID, 2017)

La digestión anaeróbica es un proceso realizado por bacterias y otros microorganismos como protozoos en condiciones específicas, es decir, en un medio con una temperatura elevada de alrededor de 55°C y una atmósfera inerte de oxígeno.

La mayoría de los proyectos actuales emplean motores de combustión interna, turbinas y micro turbinas. Concretamente, lo más empleados son los motores de combustión interna debido a su bajo costo por kW y su rendimiento varía entre el 27 y 40%.

La generación de electricidad a partir de estos equipos, permite un aparte considerable a la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) pues se cierra el ciclo de carbono de los residuos orgánicos. Es decir, cuando un ser vivo muere se descompone emitiendo CO<sub>2</sub> a la atmósfera por lo que al quemar el biogás las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas no representan una contaminación a la atmósfera pues se cierra dicho ciclo.

Por lo tanto, desde el punto de vista ambiental, es muy interesante.

### 2.5 Hidrógeno

Este elemento es uno de los más abundantes en el universo, y siempre se encuentra ligado a otros elementos, como carbono, oxígeno, formando distintos tipos de moléculas.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Este elemento se puede considerar como una de las fuentes mas efectivas y limpias de energía dado que proporciona la mayor cantidad de energía por unidad de peso sin emitir ningún tipo de contaminante y gases de efecto invernadero. (Alberto Rodríguez Bachiller, 2012)

Actualmente, se conocen muchas formas de poder producirlo, ya sea a partir de combustibles fósiles, biomasa, o como se centrará este trabajo, su producción a partir de la electrólisis del agua. A diferencia de otros vectores energéticos renovables, el hidrógeno tiene la capacidad de ser almacenado, como gas a presión o en estado líquido lo que le permite un mayor grado de gestionabilidad.

### **2.5.1 Economía del Hidrógeno en la UE**

El hidrógeno renovable, va a jugar un papel crucial para la descarbonización de la economía y de esta manera alcanzar la neutralidad climática en 2050 en la Unión Europea a partir del acuerdo "Green Deal".

La Unión Europea tiene desarrollado un plan muy ambicioso que consiste. en una implementación efectiva de las tecnologías de hidrógeno para el 2030 y 2050. También llamado la Estrategia Europea del Hidrógeno (EU hydrogen strategy), que abarca todos los aspectos a tener en cuenta tales como las inversiones necesarias, i+D o el marco regulatorio para la reducción de emisiones dentro de la unión.

Para garantizar el avance de las tecnologías del hidrógeno renovable, la unión ha establecido tres horizontes temporales:

- Primera fase 2020-2024: Instalación de al menos 6GW de electrolizadores en la UE y la producción de hasta un millón de toneladas de hidrógeno renovable, con el fin de descarbonizar la producción de hidrógeno existente.
- Segunda fase 2025-2030: El hidrógeno debe convertirse en una parte intrínseca del sistema energético con el objetivo de instalar 40GW de electrolizadores para 2030 y la producción de hasta 10 millones de toneladas de hidrógeno renovable en la UE. Este empezará a desempeñar un papel en el equilibrio y en la flexibilización de un sistema eléctrico basado en energías renovables.
- Tercera fase 2030-2050: Las tecnologías de hidrógeno alcanzarán la madurez y su despliegue a gran escala, especialmente para la producción de electricidad verde. También deberá llegar además de llegar a todos los sectores que se pueden considerar difíciles de descarbonizar.

### **2.5.2 Oportunidad para España**

El gobierno de España ha diseñado una Hoja de ruta Del Hidrógeno, ofreciendo una visión 2030 y 2050, con el objetivo de identificar los retos y oportunidades para el desarrollo del hidrógeno renovable en el país.

De esta manera poder impulsar un desarrollo sostenible y crecer hacia una economía descarbonizada mediante el impulso de la cadena de valor del hidrógeno. Este elemento, jugará un papel relevante en los restos transversales tales como la reactivación económica tras la crisis sanitaria del SARS-COV2, la transición justa, el reto demográfico y la economía circular.

El desarrollo del hidrógeno permitirá un cambio de paradigma en el futuro del país:



## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

- Permitir la penetración de un mayor porcentaje de energías renovables en el sistema eléctrico provocando un mayor grado de gestionabilidad.
- Convertir a España en una de las potencias europeas de generación de energía verde.
- Impulsar la descarbonización de los sistemas energéticos aislados.

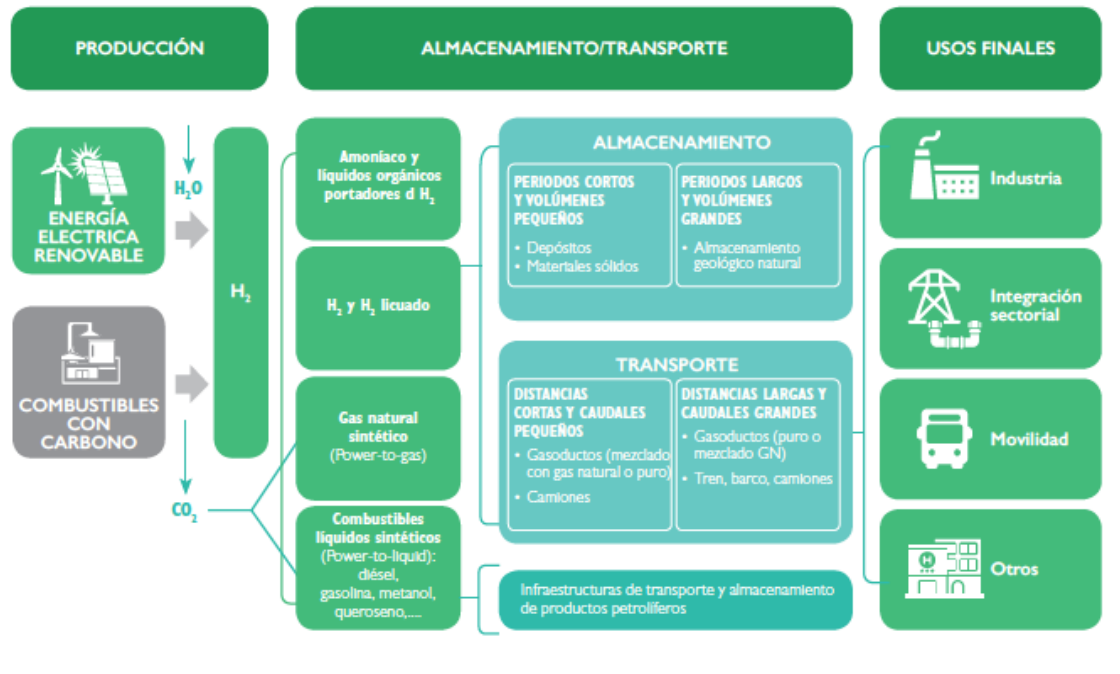


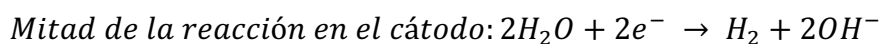
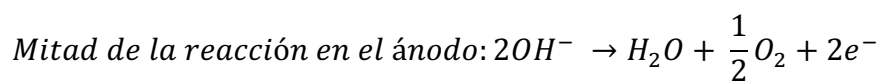
Ilustración 7: Aplicaciones de la tecnología del hidrógeno. Fuente: Hoja de ruta del hidrógeno

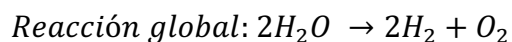
### 2.5.3 Electrólisis

El hidrógeno se considera uno de los mejores medios para almacenar energía procedente de fuentes renovables. Este proceso se basa en la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua mediante membrana de intercambio protónico que proporciona una solución sostenible para la producción de H<sub>2</sub>, por lo que se dice que se almacena energía renovable en forma de hidrógeno, el cual es denominado hidrógeno verde dado que no se genera ninguna emisión de CO<sub>2</sub> en toda la cadena de producción.

La electrólisis es un proceso electroquímico, de carácter endotérmico, a través de la cual una sustancia (electrolito) es descompuesto cuando una tensión externa en continua es aplicada a dos electrodos (cátodo y ánodo) que están en contacto con el electrolito.

Para que la electrólisis ocurra, la tensión en continua debe superar el umbral de voltaje que depende del tipo de material y se conoce como voltaje de descomposición. En este momento, el electrolizador disocia el agua en hidrógeno y oxígeno. La tensión de descomposición teórica del agua es de 1,23V, sin embargo en la práctica, los voltajes necesarios deben de ser algo mayores.





Ecuación 1: Ecuación de la electrólisis del agua. Fuente: Elaboración propia

## 2.5.4 Electrolizadores

En la actualidad para la producción de hidrógeno a partir de electricidad renovable se emplean diversas tecnologías disponibles, sin embargo, las más comunes y que están disponibles a nivel comercial son los electrolizadores alcalinos (AEL) y de membrana polimérica (PEM). La diferencia principal entre ambas tecnologías se basa de en el tipo de electrolito.

Hoy en día, la producción de hidrógeno comercial se ordena de mayor a menor madurez tecnológica: electrolizadores alcalinos (AEC), membrana de intercambio de protones (PEM) y de estado sólido o de alta temperatura (SOEC).

Sin embargo, resulta difícil comparar entre diferentes diseños y estrategias de operación, o requerimientos deseados. De esta manera, se define la eficiencia de un electrolizador como la energía necesaria en kWh por kg de hidrógeno producido.

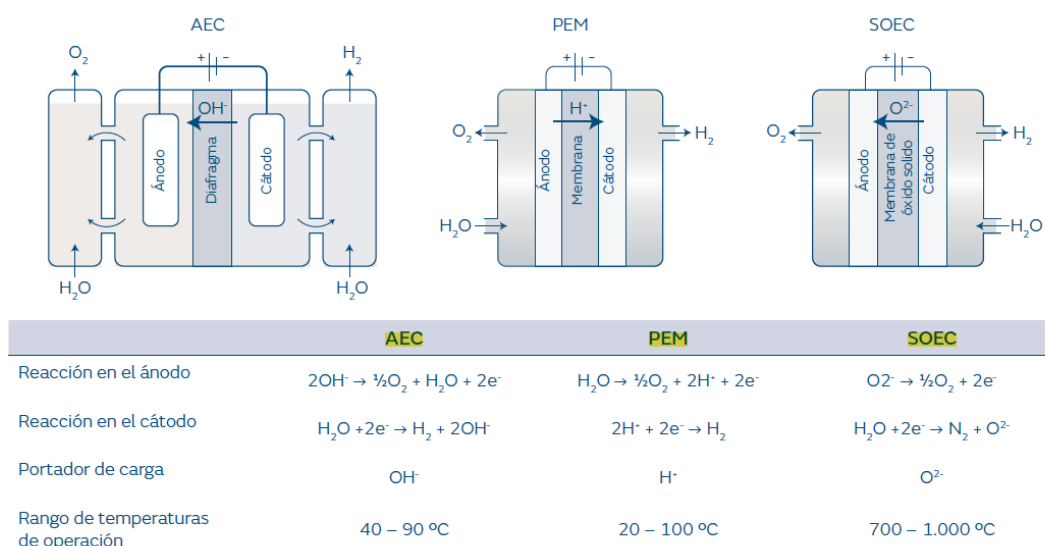


Ilustración 8: esquema de funcionamiento y reacciones de diferentes tipos de electrolizador. Fuente: Naturgy

A continuación, se discutirán estas tecnologías.

### Electrolizadores Alcalinos (AEL)

La producción de hidrógeno a partir de esta tecnología es comúnmente conocida debido a su antigüedad por lo que se considera como la tecnología de electrólisis más desarrollada hasta la fecha.

La electrólisis, se produce en una celda compuesta por dos electrolitos sumergidos en una disolución acuosa de hidróxido de potasio (KOH) debido a su gran conductividad iónica. Las concentraciones típicas de disolución KOH son de alrededor de 25 y 30% en peso para ofrecer la máxima conductividad. Por otra parte, la conductividad aumenta también con la temperatura, alcanzando su máximo para una temperatura de 150°C. Sin embargo, la temperatura habitual de los electrolizadores alcalinos comerciales se sitúa en unos 80-90°C.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

La concentración del electrolito se mantiene constante durante el proceso mediante la adición de agua, dependiendo de la velocidad de producción de hidrógeno. (R.M Navarro, 2015).

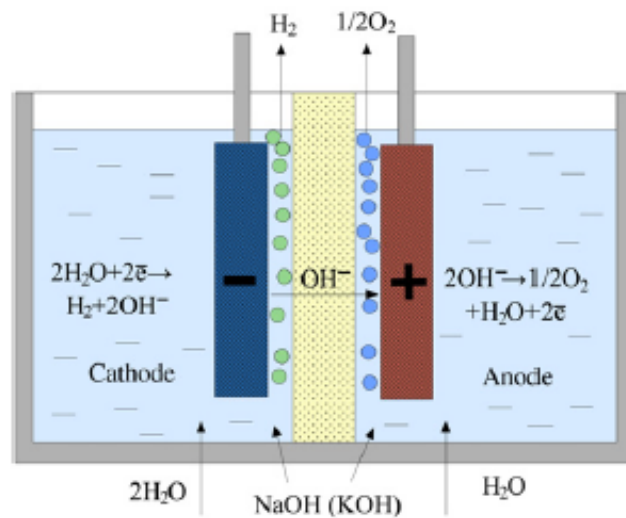


Ilustración 9: Esquemna de una celda de electrólisis alcalina. Fuente: Researchgate

En la figura adjunta, se puede observar un separador entre los dos electrodos que permite evitar la recombinación de  $\text{H}_2$  y  $\text{O}_2$  en agua. Conforme la densidad de corriente aumenta la cantidad de burbujas gaseosas aumenta formando una capa resistiva en la superficie de ambos electrodos. Por este motivo, la densidad de corriente esta limitada a unos varios  $100\text{mA}/\text{cm}^2$  para que no se impida la formación de hidrógeno.

Actualmente existen configuraciones de electrolizadores alcalinos más eficientes llamados “Zero gap cell-configuration” que constan de varias celdas unitarias existiendo de esta manera dos configuraciones posibles: monopolar o bipolar. Estos tipos de configuraciones permiten una mayor densidad de corriente de trabajo, concretamente alrededor de  $1,25\text{ A}/\text{cm}^2$  con presiones elevadas de entre 5-40 bars, y temperaturas de entre 80-120°C.

En una configuración monopolar, las celdas electrolitas están conectadas en paralelo, provocando que todos los cátodos y ánodos estén conectados entre si, sin embargo, están físicamente separados entre sí. Su temperatura normal de trabajo se sitúa entre los 60 y 90°C, y su presión similar a la atmosférica.

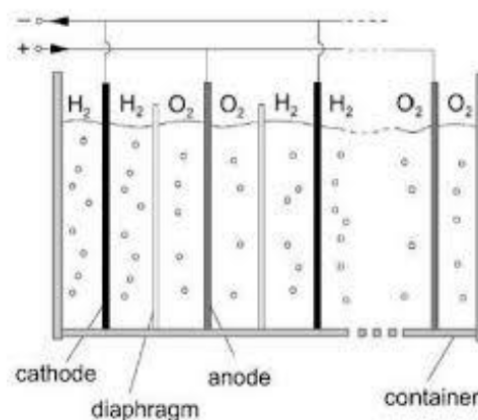


Ilustración 10: esquema de un electrolizador monopolar. Fuente: Energiaquímica.net

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Por otra parte, la configuración bipolar se caracteriza por que las celdas electrolíticas están conectadas en serie, de modo que cada celda consiste en un diafragma comprimido por ambos lados por un electrodo. A causa de esto, los electrolizadores bipolares son más complejos y exigen un mayor grado de precisión en su proceso de fabricación.

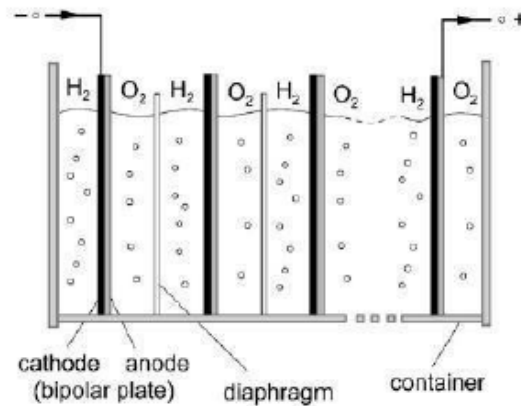


Ilustración 11: esquema de un electrolizador bipolar. Fuente: [energíaquímica.net](http://energíaquímica.net)

Para esta tecnología no se esperan grandes avances en cuanto a su tecnología se refiere. Sin embargo, un avance en el proceso de fabricación y sus componentes permitirá abaratar sus costes. Por otra parte, se espera que para 2030, la densidad de corriente aumente de  $0,5 \text{ A/cm}^2$  a  $1 \text{ A/cm}^2$  gracias a una mejora de los catalizadores y nuevos materiales que mantengan una estabilidad en entornos alcalinos.

En la figura adjunta, se puede observar el coste de producción de los sistemas alcalinos, actualmente, el precio varía en 400 y 900 €/kW, y el precio intermedio está en alrededor de 750€/kW. Por otra parte, se puede ver que la curva de coste se estabiliza entre 2020 y 2030 sin gran variación de costes. (BERTUCCIOLI, L. C., 2014)

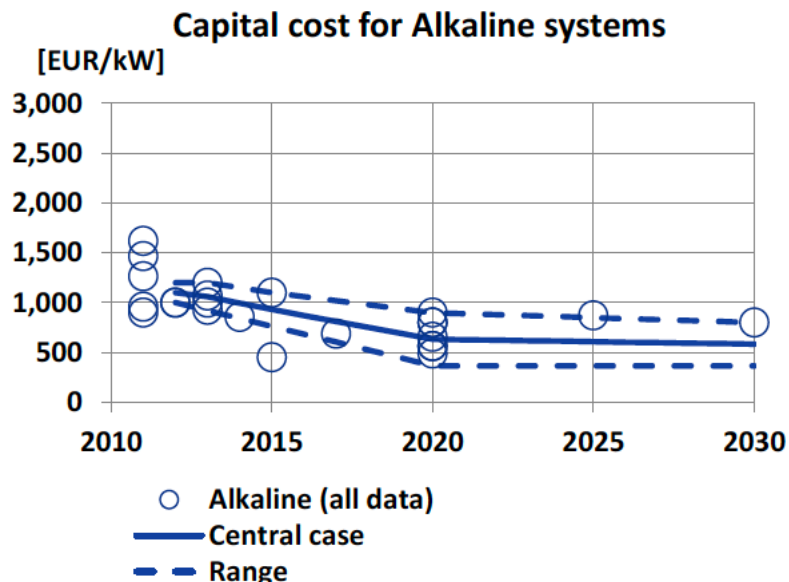


Ilustración 12: Costes de capital tecnología alcalina. Fuente: *Study development of water electrolysis in the EU E4TECH*

En esta figura, se observa la energía consumida por cada kg de hidrógeno producido, además se puede ver que no va a haber una gran evolución en la cantidad de energía requerida. En

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

condiciones normales de funcionamiento, para ambas configuraciones la eficiencia se sitúa entre un 60 y 75%.

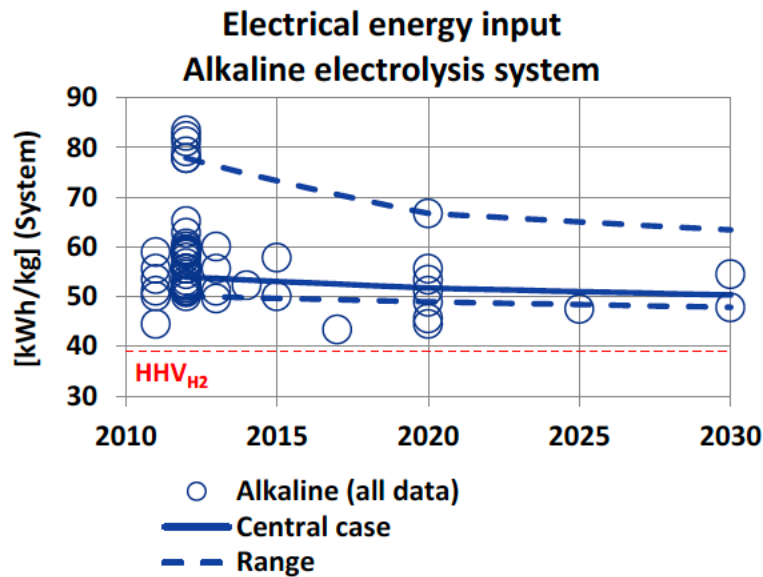


Ilustración 13: Evolución de la energía requerida para la producción de hidrógeno. Fuente: Study development of water electrolysis in the EU E4TECH

Desde el punto de vista económico, esta tecnología es la más viable debido a su vida útil elevada de 60000h. Por el contrario, un hándicap de esta tecnología es que no puede operar con densidades de corriente bajas, por lo que su uso queda reducido a para sistemas híbridos de generación renovable debido a la fluctuación de producción eléctrica.

### Electrolizadores de membrana polimérica (PEM)

Los electrolizadores de membrana polimérica fueron creados en las década de 1960 por la empresa General Electric Co. que es cuando los polímeros conductores de protones empezaron a ser comercializados representando la segunda tecnología más importante en la electrólisis del agua.

Se considera como una de las mas efectivas y seguras para producir hidrógeno a partir de agua, se trata de una tecnología compacta y limpia, con mayores ventajas frente a los alcalinos.

Las principales ventajas de este tipo de tecnología son:

- Posibilidad de operar las celdas con una gran densidad de corriente
- Gran dinamismo del rango de producción que permite adaptarse fácilmente a la intermitencia de las renovables.
- Las pérdidas óhmicas son reducidas por lo que aumenta la eficiencia
- Capacidad de operar a voltajes de celda más bajos
- Sistema mas compacto

Las eficiencias de esta tecnología pueden llegar a alcanzar el 100%, sin embargo, por lo general suelen trabajar entre un 70-90% de su capacidad. Una de las principales características de estos electrolizadores es que se puede obtener hidrógeno de una pureza del 99,99%, además de tener una vida media de 15000h.

En esta tecnología emplea membranas poliméricas perfluorada conductora de protones, sirviendo al mismo tiempo de separador y electrolito.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

La resistividad de las membranas es significativamente superior a la de los sistemas de electrólisis alcalina (11-12 Ohm cm a 20°C y 5-6 Ohm a 80-90°C). Para reducir las pérdidas óhmicas es necesario emplear membranas de un espesor de entre 100 y 300 micrometros.

El agua, en contacto con esta membrana se disocia en grupos de iones, Como resultado los protones pueden moverse libremente de un electrodo a otro a través de grupos de ácido sulfónico (HSO-3), que facilita la conducción protónica.

Estas membranas se caracterizan por ser muy ácidas, lo que provoca que se necesiten emplear materiales resistentes frente a un medio ácido. Comúnmente, se emplean metales muy nobles como el platino, rutenio o rodio, por ejemplo.

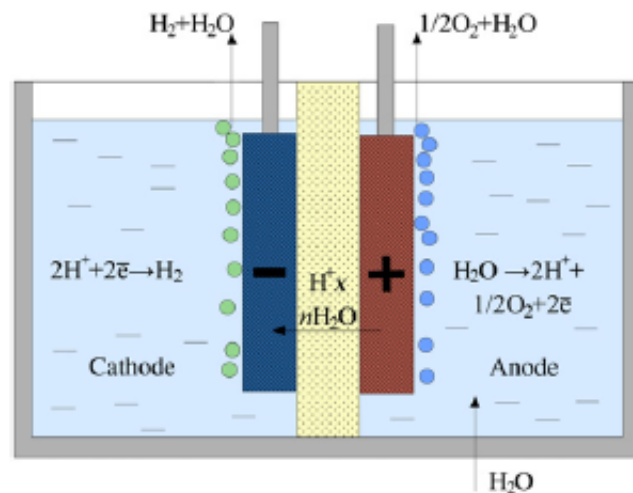


Ilustración 14: Celda de membrana polimérica. Fuente: Researchgate.com

En este tipo de electrolizador no hay líquido electrolito por lo que los electrodos han de ser mantenidos unidos a la membrana (zero-gap configuration), y ofrecer una gran superficie de contacto entre el catalizador y el electrolito. El catalizador debe de ser mantenido unido a la membrana del electrolito donde se produce el intercambio protónico.

Estos dispositivos tienen la capacidad de trabajar a 200 bar, lo cual evita la necesidad de compresión del hidrógeno para su almacenamiento, sin embargo, la presión media de trabajo es de unos 30 bar y la temperatura es inferior a las 100°C.

En la figura adjunta, se puede observar el coste de producción de los sistemas alcalinos, actualmente, el precio varia en 750 y 1300 €/kW, y el precio intermedio esta en alrededor de 900€/kW. Por otra parte, se puede ver que la curva de coste sigue disminuyendo entre 2020 y 2030.

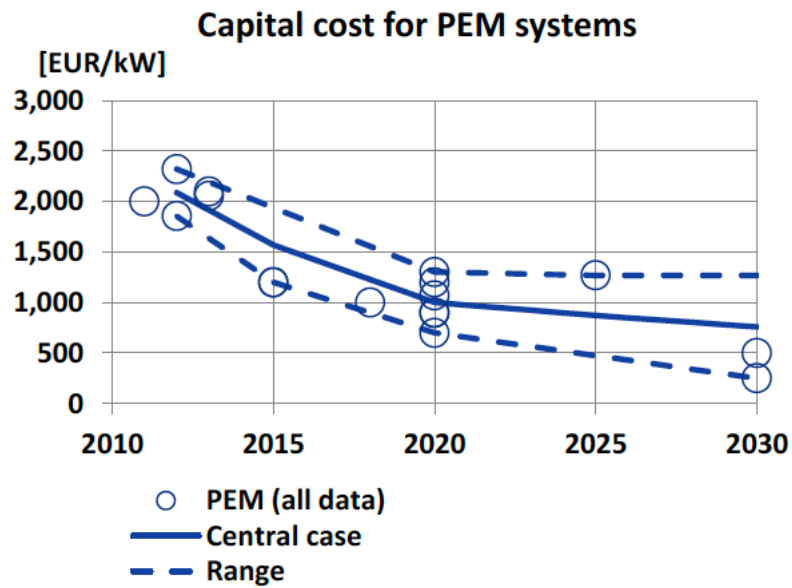


Ilustración 15: Costes de capital tecnología polimérica. Fuente: Study development of water electrolysis in the EU E4TECH

En esta figura, se observa la energía consumida por cada kg de hidrógeno producido, además se puede ver que no va a haber una gran evolución en la cantidad de energía requerida. En condiciones normales de funcionamiento, para ambas configuraciones la eficiencia se sitúa en un 50%.

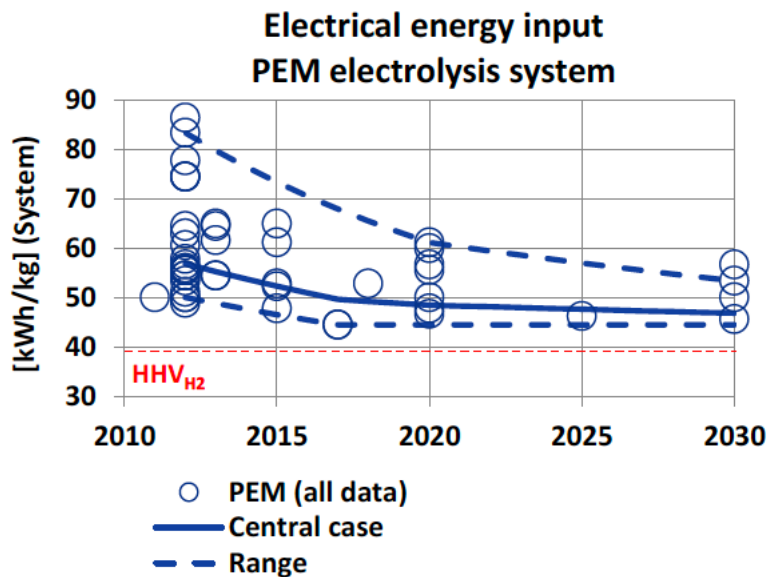


Ilustración 16: Ilustración 13: Evolución de la energía requerida para la producción de hidrogeno. Fuente: Study development of water electrolysis in the EU E4TECH

### Electrolizadores de electrolito de óxido sólido (SOEC)

Los electrolizadores SOEC, representan la tecnología mas joven en cuanto a la electrólisis del agua se refiere, pero tiene un futuro prometedor debido a las altas eficiencias que presenta.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Esta tecnología utiliza un electrolito sólido compuesto por un material cerámico permitiendo que conduzca selectivamente iones de oxígeno.

La celda de estos electrolizadores, está compuesta por un electrolito conductor de iones de oxígeno y dos electrodos porosos.

Para realizar la división del agua, se aplica un potencial en ambos electrodos que superado un umbral, provocando que se disocie esta molécula en iones de oxígeno y gas hidrógeno en la interfaz cátodo-electrolito.

El hidrógeno producido se propaga a través de la superficie del cátodo donde se recogen. Por otra parte, los iones de oxígeno se transportan por el electrolito hasta el ánodo, donde son oxidados para formar moléculas de oxígeno, que se mueven a través del material poroso del ánodo hasta su superficie y conducidos a través de un canal de gas.

Generalmente las condiciones de trabajo se caracterizan por una temperatura media elevado de alrededor de 650-1000°C, estas altas temperaturas de trabajo provocan un bajo voltaje de electrólisis por lo que en la actualidad se está investigando formas para conseguir que estos dispositivos trabajen a temperaturas más bajas, de hasta los 500-700°C.

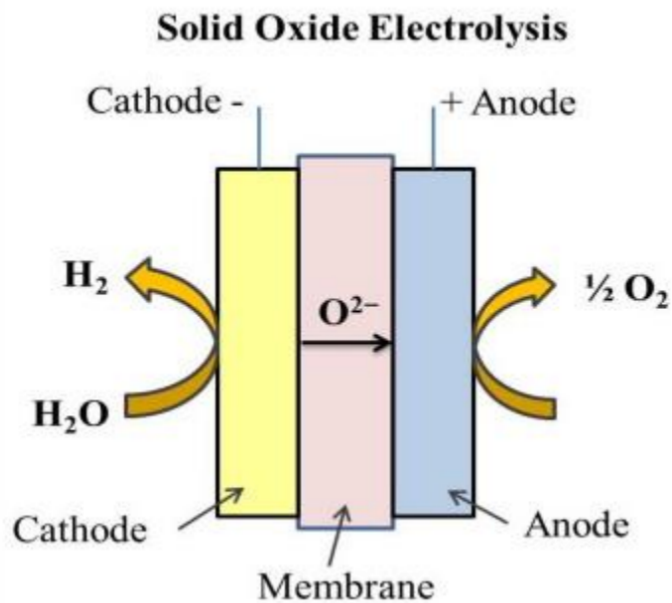


Ilustración 17: Esquema de un electrolizador SOEC. Fuente: Kumar & Himabindu, 2019



## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

En la siguiente figura, se tiene una tabla resumen de las principales características de los distintos tipos de electrolizadores.

Stack			
Electrolito	Solución de KOH	Membrana polimérica	Óxido sólido
Portador de carga	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	O <sub>2</sub> <sup>-</sup>
Densidad de corriente (A/cm <sup>2</sup> )	0,5	2,0	2,0
Voltaje (V)	1,75 - 2,4 V	1,6 - 2,0 V	1,2 - 1,3 V
Temperatura de operación (°C)	60 - 80	50 - 80	650 - 1.000
Presión de trabajo (bar)	1 - 30	30 - 80	1
Eficiencia eléctrica (kWh/Nm <sub>3</sub> de H <sub>2</sub> producido)	4,3 - 5,5	4,5 - 5,4	3,2 - 3,7
Eficiencia eléctrica (% PCI)*	63 - 70	56 - 60	74 - 81
Sistema genérico			
Consumo eléctrico a capacidad nominal (kWh/kg)	51	55-70	41-40
Coste capital (€/kW)	750	1.200-2.000	12.000-4.500
Costes de O&M (€/kg/día/año)	32	58	600-225

\*PCI: Poder calorífico inferior

*Ilustración 18: Tabla resumen de las principales características*

### 2.4.5 Pila de combustible de membrana polimérica (PEMFC)

Las pilas de combustibles son dispositivos empleados para transformar un combustible en energía eléctrica mediante una transformación electroquímica. En el caso se emplea el hidrógeno como combustible y se obtiene únicamente agua como subproducto. Estos dispositivos son considerados como un elemento clave en conseguir que la economía del hidrógeno sea una realidad permitiendo desarrollar una economía verde, dado que son de emisión cero.

Las pilas de combustible presentan una gran variedad de aplicaciones, ya sea para la producción masiva de electricidad, a nivel residencial a pequeña escala, o para la automoción. La gran versatilidad de las aplicaciones de la pila de combustible ha provocado un auge en su investigación durante las últimas dos décadas.

Este tipo de dispositivo puede ser clasificado en función del tipo de electrolito o tipo de combustible utilizado. Los principales grupos de pilas de combustible son los siguientes:

- AFC: "Alkaline Fuel Cell", Pila de combustible alcalina
- PEMFC: "Proton Exchange Membrane Fuel Cell", Pilas de combustible de intercambio protónico
- PAFC: "Phosphoric Acid Fuel", Pila de combustible de ácido fosfórico
- MCFC: "Molten Carbonate Fuel Cell", Pila de combustible de carbonato fundido
- SOFC: "Solid Oxide Fuel Cell", Pila de combustible de óxido sólido
- DMFC: "Direct Methanol Fuel Cell", Pila de combustible de methanol directo

En general, el desarrollo de esta tecnología se ha centrado principalmente en el desarrollo de membranas eficientes y fiables, concretamente en las pilas de combustible con membranas de intercambio protónico o de tipo PEM.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

La celda básica de una pila de combustible está formada por una capa electrolítica, concretamente una membrana de polímero sólido, en contacto con dos electrodos, un ánodo y un cátodo. El hidrógeno entra por el ánodo y el oxígeno en forma de aire entra por el cátodo. El hidrógeno es descompuesto en el ánodo en iones positivos y negativos mediante un catalizador, normalmente metales nobles como por ejemplo el platino.

La figura adjunta, muestra un esquema simplificado de la pila de combustible en se puede observar dicho proceso. La membrana electrolítica permite solamente el paso de los  $H^+$  en una dirección hacia la zona catódica, impidiendo el paso de los electrones. A través de un circuito externo, se genera una corriente eléctrica donde los electrones acceden al cátodo. En esta zona también se recombinan los protones de hidrógeno, electrones con oxígeno para formar agua y se obtiene calor como subproductos, que es arrastrada afuera del dispositivo.

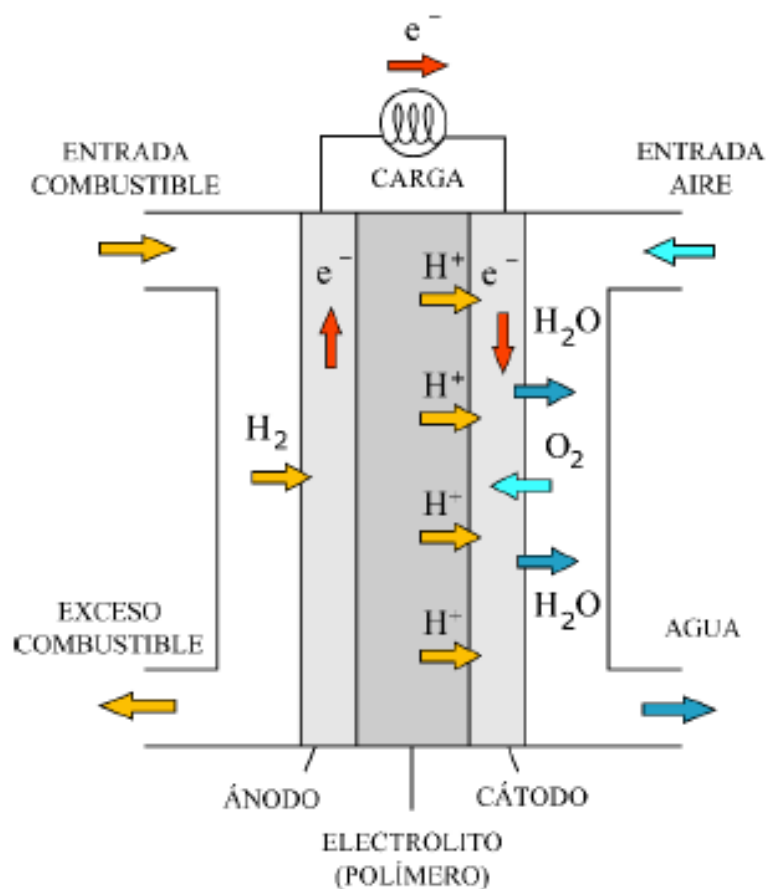
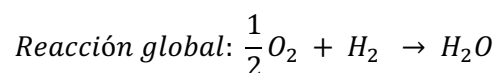
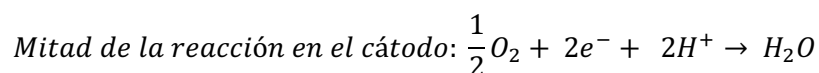
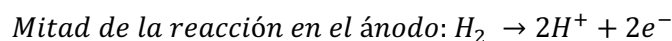


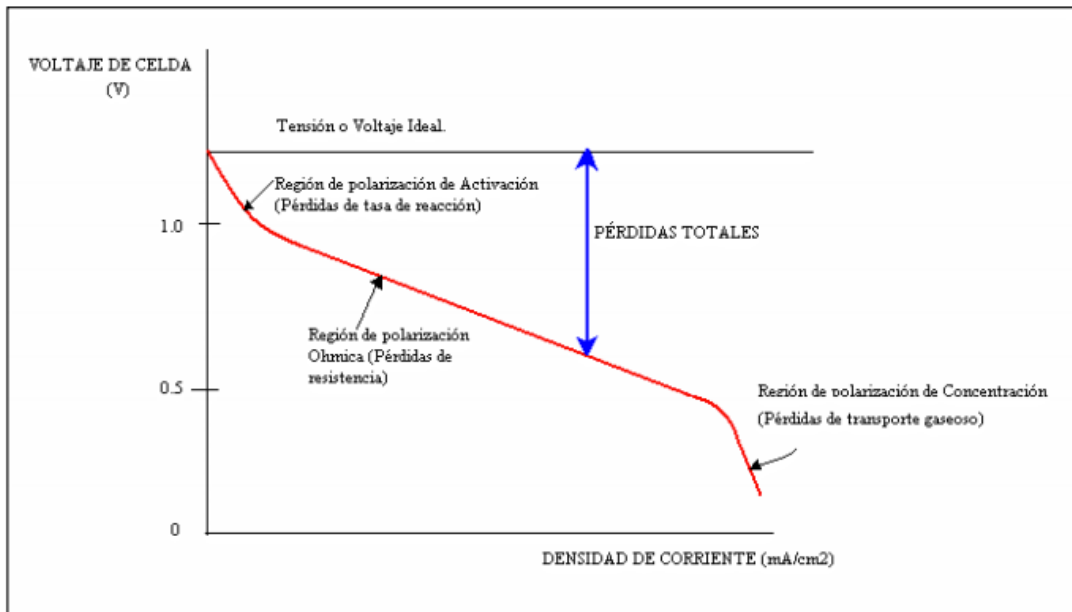
Tabla 1: Diagrama de funcionamiento de una celda de pila de combustible. Fuente: imágenes de google



Ecuación 2: Reacción de la pila de combustible. Fuente: elaboración propia

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Se debe constatar que el potencial real que se puede obtener de estos dispositivos es siempre menor respecto al valor teórico a causa de las pérdidas irreversibles. Como consecuencia de estas pérdidas, el voltaje de una celda es menor que el ideal. En la figura adjunta se puede observar como varía el voltaje a causa de estas pérdidas.



*Ilustración 19: Curva característica tensión-densidad de corriente de una celda teniendo en cuenta las pérdidas. Fuente: energias-renovables.com*

Estas pérdidas son denominadas polarizaciones, a continuación se explicaran estas mismas:

- **Polarización de activación:** estas pérdidas son debidas a las reacciones electroquímicas dado que existe una barrera energética que no puede ser superada. La polarización de activación depende de los tipos de electrodos y reactantes empleados.
- **Polarización Óhmica:** Las pérdidas óhmicas ocurren a causa de la resistencia en el electrolito contra el flujo de iones y así como la resistencia al flujo de electrones a través de los materiales del electrodo.
- **Polarización de concentración:** al ocurrir una reacción electroquímica en un electrodo, existe una perdida de potencial debida a la incapacidad del material circulante a mantener la concentración inicial del fluido. Este tipo de pérdidas están altamente relacionadas con la densidad de corriente y las características de los electrodos.

Las celdas elementales que constituyen una celda de combustible tienen una capacidad de suministrar una tensión muy pequeña de alrededor de 1V, y cuya corriente depende de los electrodos seleccionados y de la densidad de corriente, lo que significa que la calidad del catalizador empleado juega un papel muy importante.

Para poder obtener voltajes más altos, se apilan las celdas elementales formando un apilamiento de celdas o también llamado "fuel cell stack". Para poder aumentar la intensidad de la corriente se deben disponer las placas en paralelo.

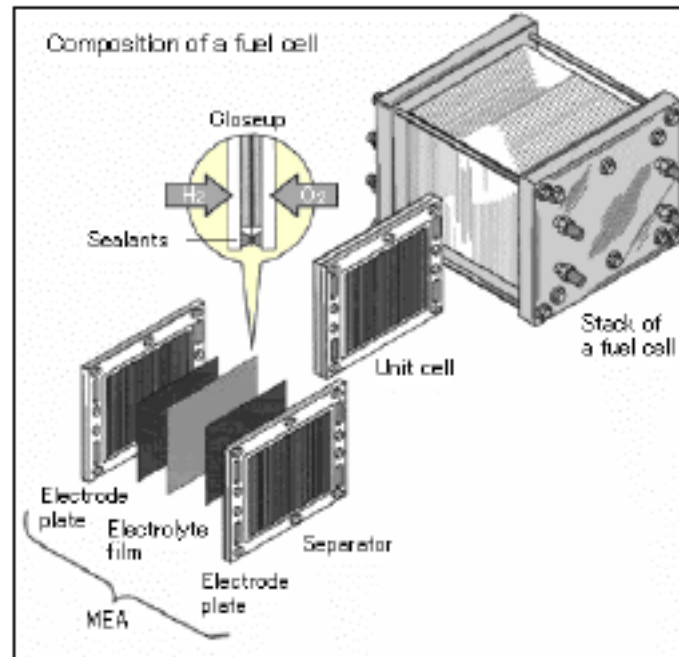


Ilustración 20: Stack de una pila de combustible. Fuente: Google

### 2.5.6 Tanque de almacenamiento

En aplicaciones para instalaciones en modo isla o para prever satisfacer la demanda energética en momentos de baja intensidad solar, la energía almacenada y transformada en electricidad. A la hora de seleccionar la tecnología adecuada se tiene que tener en las necesidades de la instalación, las ventajas y desventajas de cada sistema de almacenamiento.

El hidrógeno es el gas con menor densidad y el segundo con menor punto de ebullición, a causa de estos motivos su almacenamiento no es para nada sencillo.

La manera más simple de almacenar este elemento se basa en un sistema de almacenamiento de gas comprimido a altas presiones dada su baja densidad energética.

Actualmente se almacena el hidrógeno en tanques con fibra de carbono revestidos con una capa de aluminio, estos pueden soportar unas presiones de hasta 700 bar. Para almacenar el hidrógeno como líquido, se deben alcanzar temperaturas criogénicas dado que el punto de ebullición del hidrógeno a temperatura ambiente es de  $-252.8^{\circ}\text{C}$ . Por otra parte el hidrógeno se puede almacenar en superficies sólidas por adsorción o en sólidos mediante absorción. (HFTO, 2012)

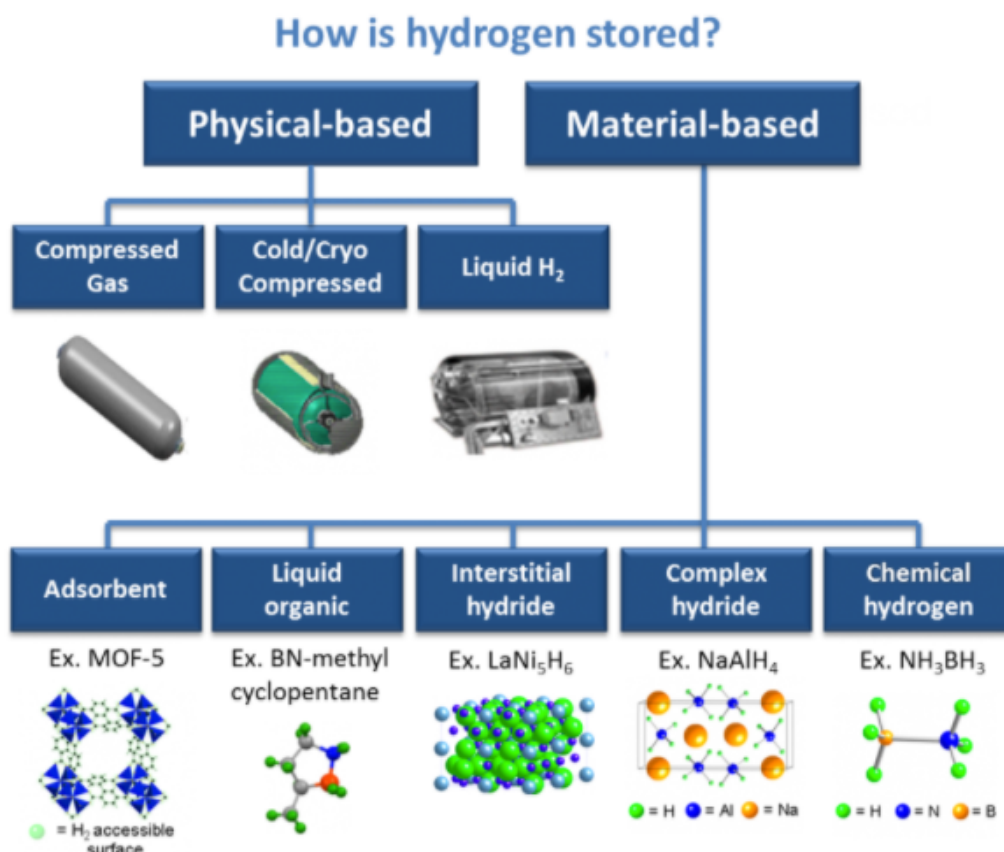


Ilustración 21: Formas de almacenamiento de hidrógeno. Fuente: NREL

Por otra parte, existen la posibilidad de almacenar el hidrógeno de manera sólida mediante hidruros metálicos, estos atrapan las moléculas de hidrógeno o son absorbidos en materiales porosos a base de carbono.

## 2.6 Homer

El programa Homer o también llamado “Hybrid Optimizations of Multiple Energy Resources) fue diseñado por el Departamento de energía de Estados Unidos, concretamente por el “National Renewable Energy Laboratory” (NREL) en la década de los dos-mil.

Este software se concibió para la modelizar y evaluar la viabilidad económica de las diferentes soluciones a la hora de diseñar un proyecto ya sea conectado a la red o en modo isla, mediante el establecimiento de diferentes inputs como el tipo de tecnología a emplear para la generación de electricidad, o el sistema de almacenamiento deseado.

## **CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO**

### **3.1 Ara de los Olmos**

Ara de los Olmos es un pequeño municipio perteneciente a la provincia de Valencia (39°55'32"N 1°08'01"), con una población de alrededor de 400 habitantes que cuenta con una superficie de 74 km<sup>2</sup>.

Este municipio tiene una economía basada principalmente en la agricultura, ganadería para consumo local y el turismo rural.

Durante los meses de verano, su población se ve aumentada a causa de las segundas residencias que tienen muchas personas. A causa de esto, su demanda energética aumenta enormemente durante los meses de verano.

### **3.2 Demanda eléctrica**

Ahora se va a proceder a analizar la demanda energética del municipio gracias a los datos proporcionados por la compañía eléctrica del municipio. Los datos proporcionados están caracterizados mediante la media mensual horaria durante todo el año.

En la siguiente figura se puede observar la potencia demandada mensualmente por el municipio.

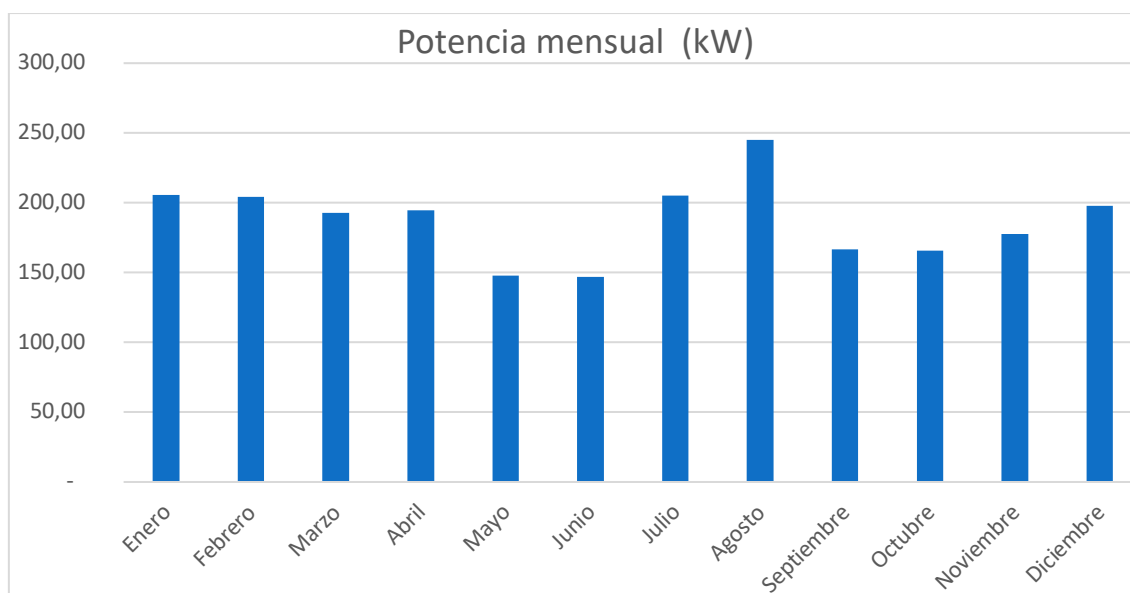


Ilustración 22: Potencia demandada mensualmente. Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que los meses de máxima demanda corresponden a los meses de verano, concretamente el mes de agosto, con un pico de demanda de 245,08kWp. Este suceso se debe

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

al aumento de la población durante los meses de verano y al uso de los sistemas de climatización.

Durante los meses de primavera, la demanda disminuye hasta los 147,08kWp, se puede atribuir esto a las temperaturas primaverales que hacen que no se necesiten utilizar los equipos de climatización.

Para poder realizar un estudio mas exhaustivo, se va a analizar la demanda energética de manera horaria por meses.

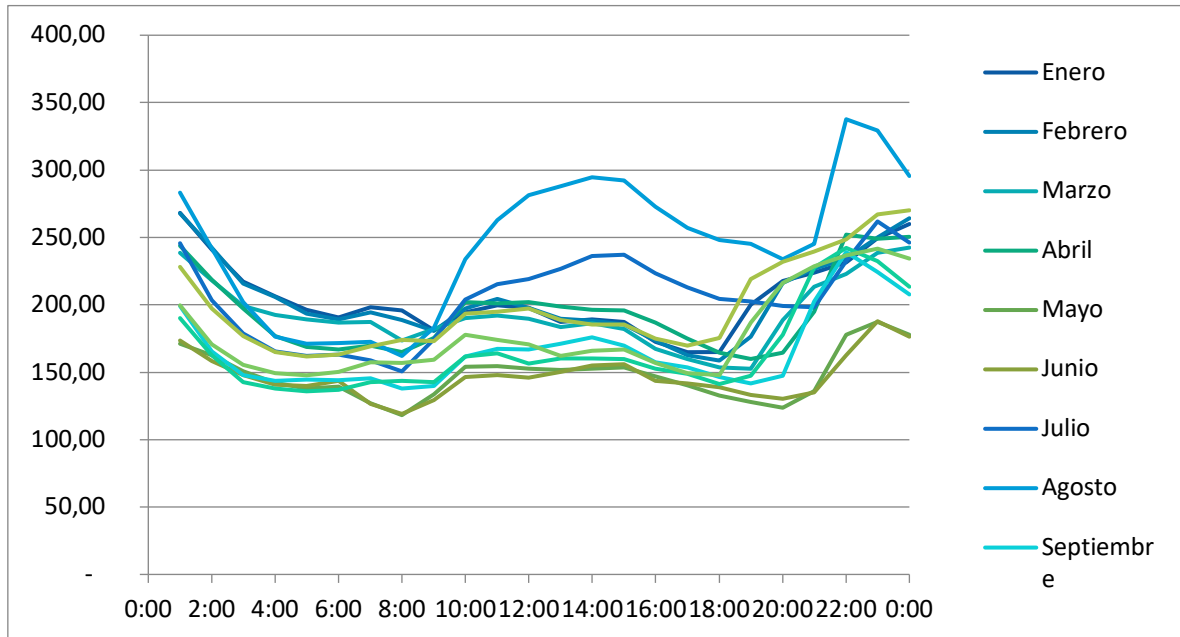


Ilustración 23: Evolución de la demanda energética diaria. Fuente: elaboración propia

Esta figura muestra un perfil típico de la demanda energética a lo largo de un día, es decir, un bajo consumo por la noche de 00h a 06h, un aumento paulatino a lo largo de la jornada laboral disminuyendo hasta las 18h, a causa de la puesta del sol que es cuando vuelve a aumentar hasta la hora de dormir entre las 22h y 00h.

Concretamente, es el mes de agosto a las 22h que se produce el pico de máxima demanda alcanzando los los 337,6 kWp, pudiéndose suponer que esto se debe a que la mayoría de residentes del pueblo además de los veraneantes, están en sus casas con varios equipos eléctricos conectados y posiblemente el aire acondicionado.

Por lo tanto, el análisis de la demanda se generará a partir del mes de agosto con el fin de satisfacer el abastecimiento energético durante todo el año.

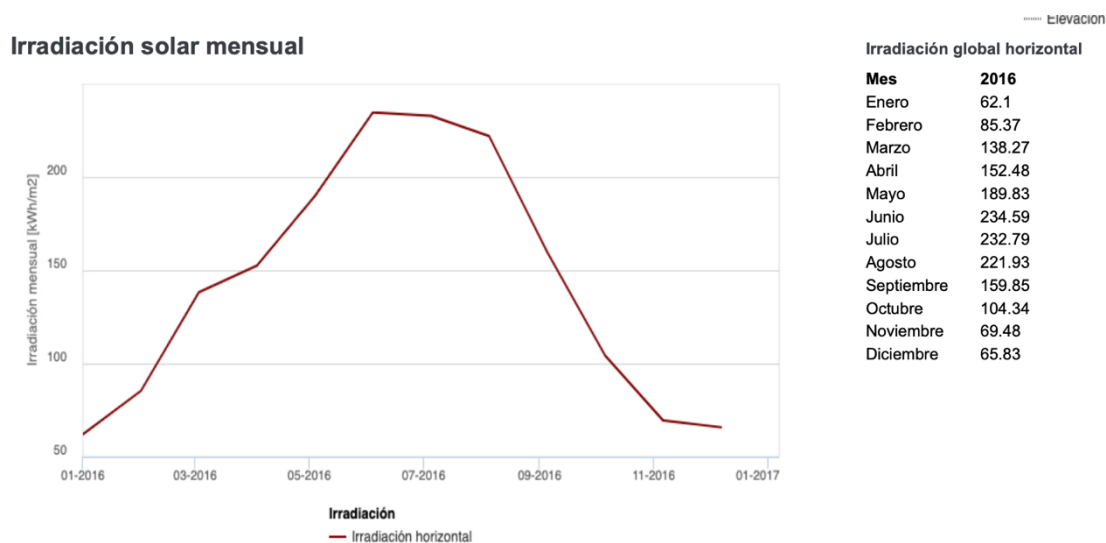
## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Energía (kWh)	5.881,93
Potencia (kW)	245,08
Potencia Pico (kW)	337,6

*Tabla 2: Demanda energética media diaria en agosto. Fuente: elaboración propia*

### 3.3 Caracterización del recurso solar

Para poder identificar el recurso solar y el potencial de producción se ha hecho uso de la herramienta de PVGIS obteniendo los datos de la radiación solar a lo largo del año.



*Ilustración 24: Irradiación solar anual. Fuente: PVGIS*

Como se puede observar, el mes de mayor producción corresponde al mes de junio.

### 3.4 INSTALACIÓN SOLAR

Al referirse a una instalación solar, hay que tener en cuenta los diversos componentes que la constituyen que forman parte de los costes, siendo estos: módulo, cableado, estructura, obra civil, margen del contratista llave en mano, otros costes.

Para el dimensionamiento de esta instalación se ha elegido un módulo fotovoltaico de la marca ERA con una potencia pico de 400Wp, en la tabla adjunta se desglosarán sus características:



Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Precio	144,95 (€)
Potencia	400 (W)
Tensión en circuito abierto (Voc)	49,8 V
Intensidad en circuito abierto (Iccmax)	10,36 A
Tensión por MPPT (Vmppt)	41,7V
Eficiencia	20,17%

Tabla 3: parámetros técnicos del módulo fotovoltaico 400W PERC monocristalino

A la hora de terminar los costes asociados al mantenimiento y operación, la obra civil, y otros costes, se ha hecho uso de una hoja de ruta sobre las energías renovables realizada por el IDAE llamada: “Plan de Energías Renovables” . Como el panel solar elegido es de tipo cristalino, los costes asociados se muestran en la gráfica adjunta. (IDAE 2011).

La instalación se diseña para una vida útil de 25 años, el reemplazo de las placas figura como un 25% de los costes asociados a la inversión dado que supone menos trabajo que la instalación.

Figura 4.9.16. Evolución de los costes de inversión de una instalación de tecnología cristalina en suelo

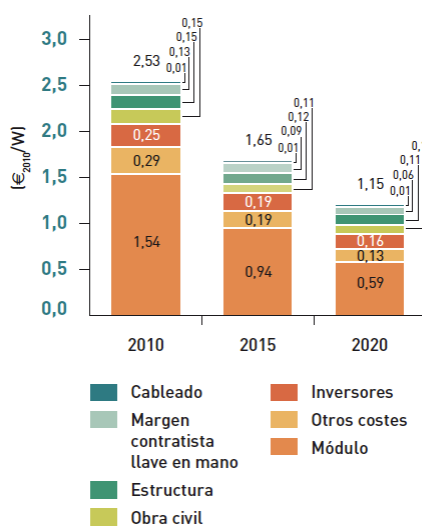


Ilustración 25: Evolución de los costes de instalación de módulos fotovoltaicos. Fuente: IDAE

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Por lo tanto los costes de inversión son los siguientes:

Módulo	144,95 €
Otros costes	0,13 €/W
Cableado	0,01 €/W
Margen contratista llave en mano	0,06 €/W
Estructura	0,11 €/W
Obra civil	0,1 €/W
O&M	0,05 €/W

Tabla 4: Tabla resumen de los costes de instalación fotovoltaicos. Fuente: elaboración propia

Los costes de instalación para una placa de 400W son:

Costes de inversión para la instalación	164 (€/placa)
Coste de la placa	144,95 (€/placa)
Inversión	309 (€/placa)
Inversión para cada kW	772,5 (€/kW)
Reemplazo	231,75 (€/placa)
O&M	20€/placa

Tabla 5: Tabla resumen de los costes de instalación por kW. Fuente: elaboración propia.

### 3.4 PILA DE COMBUSTIBLE, ELECTROLIZADOR Y TANQUE DE HIDRÓGENO

En este apartado, se desarrollarán los costes del electrolizador y pila de combustible a partir del informe "Study on development of water electrolysis in EU" realizado por E4TECH. En este informe se hace una estimación sobre los costes futuros de los electrolizadores y pila de combustible. Al tratarse tecnologías similares, los precios son muy parecidos.

En el informe indicado, se detallan los costes asociados a estas tecnologías, donde el reemplazo está entorno a un 35% de la inversión y los costes de mantenimiento y obra asciende al 5% de la potencia total a instalar. La única diferencia entre la pila de combustible y electrolizador, es que los costes de obra y mantenimiento se introducen en €/h

En la tabla adjunta, se hace un resumen de los costes de la pila de combustible y electrolizador.

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

PRECIO ELECTROLIZADOR	ESTIMACIÓN (€/KW)	850
	REEMPLAZO (€/kW)	240
	COSTES DE OPERACIÓN (€)	5%
PILA DE COMBUSTIBLE	ESTIMACIÓN (€/KW)	1000
	REEMPLAZO (€/kW)	240
	COSTES DE OPERACIÓN (€)	0.004 €/h

Tabla 6: Resumen de costes del electrolizador y pila de combustible. Fuente: elaboración propia

El precio del Tanque de hidrógeno de referencia se ha escogido a partir de diversos catálogos comerciales y se ha establecido una estimación de los costes para condiciones normales de funcionamiento. Por otra parte, los costes de O&M se sitúan en un 2% de la inversión. En la siguiente tabla se muestran los precios estipulados.

ESTIMACIÓN (€/kg)	1234
REEMPLAZO (€/kg)	1234
O&M (€/año*kg)	24,68

Tabla 7: Costes aproximados del tanque de hidrógeno. Fuente: elaboración propia

### 3.6 Modelado del proyecto

#### Normativa contemplada

El presente proyecto recoge las normativas a aplicar necesarias para cumplir con las leyes vigentes, siendo por tanto la forma de ejecución de las obras a realizar, cálculos de su empleo, calidad y tipo de materiales, de esta forma se consideraran las siguientes normativas

Reglamento Electrotécnico para baja tensión e Instrucciones Técnicas Complementarias (Real Decreto 842/2002 de 2 de agosto de 2002)

Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del sector Eléctrico

Real Decreto 244/2019, de 5 de abril. Por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica.

Real Decreto 436/2004, de 12 de marzo, por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalación de energía eléctrica.

Real Decreto 841/2002, de 2 de agosto, por el que se regula para las actividades de producción de energía eléctrica en régimen especial su incentivación en la participación en el mercado de producción, determinadas obligaciones de información de sus previsiones de producción, y la adquisición por los comercializadores de su energía eléctrica producida.

Real Decreto 1433/2003, de 27 de diciembre, por el que se establecen los requisitos de medida en baja tensión de consumidores y centrales de producción en régimen especial.

Real Decreto 1565/2010, de 19 de noviembre, por el que se regulan y modifican determinados aspectos relativos a la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

Norma UNE IEC TS 62548:2013 sobre parámetros de diseño de strings fotovoltaicos

### Aclaraciones del autoconsumo eléctrico en España.

#### Modelos vigentes:

- **Autoconsumo sin excedentes.** Estas instalaciones necesitarán un equipo antivertido que garantice que no se vierte nada de energía a la red. Su tramitación administrativa es mínima.
- **Autoconsumo con excedentes.** Son aquellas instalaciones que en ciertos momentos van a mandar energía solar a la red eléctrica, por ejemplo una vivienda o industria sin actividad en horas centrales del día. Dentro de esta modalidad distinguimos dos bloques importantes:
  - **Modalidad con excedentes acogidos a compensación.** En esta modalidad la comercializadora eléctrica compensará en nuestra factura eléctrica la *energía vertida a la red*. A esta modalidad, sin duda la más relevante del RD podrán acogerse las viviendas y las industrias con potencias instaladas inferiores a 100 Kw.
  - **Modalidad con excedentes no acogida a compensación simplificada.** Estas instalaciones son aquellas, en principio mayores de 100 Kw, cuyos excedentes van a ser volcados a la red pero en régimen de venta, no de compensación. El precio de la energía vertida será el dispuesto por la legislación de instalaciones generadoras de electricidad.

### Subvenciones

En este subapartado, se van a presentar distintas opciones para acogerse a ayudas de financiación pública para promover el impulso de proyectos de carácter renovable.

Para cada tipo de ayudas, existen distintos tipos de requisitos dependiendo de la potencia a instalar, fines económicos o su compromiso social y ambiental.

A continuación se muestran algunas ayudas tanto estatales como a nivel autonómico a las que el proyecto podría acogerse.

### IVACE

Ayuda al autoconsumo eléctrico para empresas y entidades. (IVACE.2020)



Ilustración 26: Ayudas Ivace al Autoconsumo. Fuente: IVACE

Aquí se detallan las condiciones para la solicitud de dichas ayudas:

- Proyectos de instalaciones de autoconsumo de energía eléctrica a partir de energías renovables o energías residuales, en cualquiera de las modalidades previstas en el artículo 9 de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico, y en concreto las previstas en el artículo 4 del Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica.
- A los efectos de determinación de la potencia de las instalaciones se estará a lo dispuesto en el artículo 3 del Real Decreto 244/2019.
- Costes subvencionables: Inversiones en equipos y montaje vinculados directamente a las instalaciones de autoconsumo, en concreto, sistema generador, sistema de conversión de la energía, sistema de control y regulación, equipo de medida de energía generada y, en su caso, sistema de almacenamiento

#### AYUDAS A LA INVERSIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE

Publicado en el "BOE", 5 de agosto de 2020

Ámbito de aplicación: Construcción y puesta en marcha de instalaciones de generación de energía eléctrica con energía de la biomasa, eólica y solar fotovoltaica, pudiendo incluir actuaciones de inversión que mejoren la gestión y optimicen la producción, permitiendo el uso de autoconsumo y la incorporación de la energía a mercados locales.

Costes Subvencionables: la obra civil, sistemas de acumulación: electrolizador alcalino, PEM, sistemas de almacenamiento, Subestación eléctrica, Sistemas de gestión, Elaboración del proyecto de ejecución.

En la tabla adjunta, se disponen de las dos opciones de financiación disponible.

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

FV Pequeña Potencia venta RED CON almacenamiento (Instalaciones fotovoltaicas Pequeña Potencia venta RED CON almacenamiento $100\text{kW} \leq P \leq 1 \text{ MW}$ )	1.380.000€
FV Autoconsumo CON almacenamiento (Instalaciones fotovoltaicas Autoconsumo CON almacenamiento 100 $\text{kW} \leq P \leq 10 \text{ MW}$ )	1.317.000€

Tabla 8: Presupuesto máximo orientativo. Fuente: elaboración propia

AYUDAS Y FINANCIACIÓN PARA ENERGÍAS RENOVABLES EN AUTOCONSUMO

RD 477/2021. Programas de incentivos para la ejecución de instalaciones ligadas al autoconsumo y al almacenamiento, con fuentes de energías renovables (EERR), así como a la implantación de sistemas térmicos renovables en el sector residencial, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR)

Ámbito de aplicación

Las actuaciones de generación renovable subvencionables dentro de los programas de incentivos incluyen actuaciones fotovoltaicas y eólicas para autoconsumo, entendiéndose por instalaciones de autoconsumo las establecidas en el Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica.

Por su parte, los programas de incentivos prevén como actuaciones subvencionables las nuevas instalaciones de generación, que podrán llevar asociadas instalaciones de almacenamiento.

Programa de incentivos

Realización de instalaciones de autoconsumo, con fuentes de energía renovable, en el sector residencial, las administraciones públicas y el tercer sector, con o sin almacenamiento.

Instalación Fotovoltaica autoconsumo	500-1000 €/kWp
Incorporación almacenamiento autoconsumo	140 – 490 €/kWh

Tabla 9: Programa de incentivos. Fuente: elaboración propia

**3.7 Inversor**

El modelo de inversor escogido como referencia para el dimensionamiento de esta instalación corresponde al modelo SIRIO K250 HV, de la empresa Aros-Solar, las características técnicas se detallan a continuación, a partir de la ficha técnica proporcionada por Autosolar.

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Tensión MPPT (Vmppt)	450-760
Tensión de entrada Máxima (Vmax)	880
Corriente de entrada maxima	590
Potencia de salida nominal	200
Intensidad de salida máxima	420
Eficiencia	96,3

Tabla 10: Características del inversor. Fuente: elaboración propia

A continuación los costes del inversor se detallan el precio del electrolizador a partir de los estudios publicados pro el IDEA que muestran precios orientativos sobre la evolución de los costes de esta tecnología.

Potencia total	400 kW
Precio	160 €/kW
Coste Inversor	64.000 €
Reemplazo	120 €/kW
O&M	20€/año

Tabla 11: Costes del inversor seleccionado. Fuente: elaboración propia

### 3.7 Planta fotovoltaica

En este apartado se procederá a dimensionar la planta fotovoltaica en base a la potencia mensual mas alta del año, y a partir de este valor se sobre dimensionará un 45% para asegurar la demanda durante los días del año con condiciones meteorológicas adversas. Por otra parte se podrá emplear el electrolizador para el almacenamiento de hidrógeno como sistema de apoyo en los momentos de baja irradiación solar.

Esta instalación se diseña para un para un municipio con una demanda máxima durante el mes de agosto, con una potencia media de 245 kW.

En primer lugar, se calcula el numero de módulos necesarios para la instalación teniendo en cuenta de que cada módulo entrega una potencia de 400Wp

Por lo tanto el número de módulos total necesarios será de: (se sobredimensiona un 45% más).

$$N^{\circ} = \frac{Pt}{Pt_m} = \frac{1,45 * 245000}{400} = 888,125 \approx 889$$

Ecuación 3: Número de módulos a instalar. Fuente: elaboración propia.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

---

Donde:

- N°: Número total de módulos
- $P_{t,m}$ : Potencia del módulo
- Pt: Potencia de la instalación

Una vez determinado el número de paneles a instalar, se procede a determinar el número de paneles en serie y en paralelo, en función de las características del inversor.

Se debe considerar el valor de tensión de CC cuando la temperatura ambiente en la ubicación es la mínima. Se aplican los coeficientes necesarios ya que la tensión se ve afectada por la variación de temperatura. La expresión viene dada por:

$$U_{max,DC MOD} = U_{oc(25^{\circ}C)} + [(T_{min}^{\circ} + 25)] \frac{\Delta U}{\Delta T} = 49,8 + (-3,8 - 25) * -0,0038038 = 49,9 V$$

$$U_{mpp max.DC MOD} = U_{mpp(25^{\circ}C)} + [(T_{min} - 25)] \frac{\Delta U}{\Delta T} = 41,7 + (-3,8 - 25) * -0,0038038 = 41,8 V$$

*Ecuación 4: Tensión máxima de potencia que soporta el módulo. Fuente: elaboración propia*

Donde:

$U_{max,DC MOD}$  es la tensión máxima que soporta el módulo.

$U_{mpp max.DC MOD}$  es la tensión máxima en el punto de máxima potencia que soporta el módulo.

$U_{oc(25^{\circ}C)}$  es la tensión en circuito abierto del módulo.

$U_{mpp(25^{\circ}C)}$  es la tensión en el punto de máxima potencia

$T_{min}$  La temperatura mínima de trabajo.

$\Delta U/\Delta T$  Este último término indica la variación de la tensión con respecto a la variación de temperatura, incluida en la hoja de información del fabricante siendo de  $-0,29506 \text{ } \%/^{\circ}C$ .

De acuerdo con las expresiones y con la temperatura mínima de trabajo de trabajo, siendo esta de  $3,8^{\circ}C$  se obtienen los siguientes resultados:

Cálculo de las restricciones :

Dado que se conocen los rangos de tensiones máximas que puede soportar el inversor, estando comprendida entre 450-760V, y siendo la tensión máxima de entrada de 880V.



Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

---

$$N_{mod\ serie} < \frac{U_{max\ inv}}{U_{max\ mod}} = \frac{880}{49,9} = 17,63$$

$$N_{mod\ serie} < \frac{U_{mpp\ max\ iv}}{U_{mpp\ max\ mod}} = \frac{760}{38,58} = 19,69$$

*Ecuación 5: Restricciones del numero de módulos a instalar. Fuente: elaboración propia*

El límite viene impuesto por el resultado más restrictivo siendo para este caso: 17,63.

Ahora se calcula el número mínimo de módulos mediante el uso de las mismas ecuaciones.

$$U_{mpp\ min.DC\ MOD} = U_{mpp}(25^{\circ}C) + [(T_{max} - 25)] \frac{\Delta U}{\Delta T}$$

$$U_{mpp\ min.DC\ MOD} = 41.7 + ((75 - 25)) * -0,0029506 = 41.55\ V$$

*Ecuación 6: Tensión mínima media del módulo. Fuente: elaboración propia.*

En este caso la restricción viene dada por el valor mínimo de funcionamiento del inversor.

$$N_{mod\ serie} < \frac{U_{mpp\ min\ inv}}{U_{mpp\ min\ mod}} = \frac{450}{41.55} = 10,83$$

*Ecuación 7: número de módulos en serie. Fuente: elaboración propia*

Finalmente se obtiene como resultado el numero de módulos en serie debe de estar comprendido entre los dos límites impuestos:  $10,83 < N_{mod\ serie} < 17,63$ .

### Cálculo de módulos en paralelo

Para determinar el número de paneles que se deben conectar en paralelo, será suficiente con conocer la intensidad del inversor y la intensidad de cortocircuito del módulo.

$$N_{mod\ paralelo} = \frac{I_{max\ inv}}{I_{sc\ mod}} = \frac{590}{9,74} = 60,57$$

*Ecuación 8: Número de módulos en paralelo. Fuente: elaboración propia*

Donde:

- $I_{max\ inv}$  es la intensidad máxima de entrada al inversor
- $I_{sc\ mod}$  es la intensidad de cortocircuito del módulo

$$I_{sc\ max} = I_{s\ stc}(1 + T_{max} - 25) * \alpha = 9,6 * (1 + 75 - 25) * 0,0002973 = 9,74\ A$$

*Ecuación 9: Intensidad máxima de cortocircuito. Fuente: elaboración propia.*

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

El número máximo de módulos que deberá tener la instalación como máximo en paralelo será de 66 placas.

### **3.8 Análisis del caso de estudio**

En este apartado se va a proceder a analizar los resultados obtenidos a través de la herramienta Homer, para esto se han definido previamente las variables a analizar para proceder a la simulación. Para cada tipo de configuración propuesta se ha elegido la configuración óptima de cada una de los modos de instalación en base a los parámetros técnicos y económicos.

El análisis tecno-económico permite obtener un análisis comparativo sobre cual de las simulaciones realizadas es más conveniente, y cual de las de ellas es la idónea a elegir. Por otra parte, el análisis medioambiental dará una estimación sobre la huella de carbono de la instalación y una estimación del recuso hídrico a utilizar.

#### **Parámetros Económicos**

Capital total de inversión: es el capital necesario para la instalación y puesta en marcha del proceso.

Coste de la electricidad (COE): coste promedio estimado de la energía consumida por los elementos de la instalación que permite obtener una comparativa entre las distintas configuraciones.

Valor actual neto (VAN): criterio de inversión que consiste en actualizar los cobros y pagos de un proyecto o inversión para conocer cuanto se va a ganar o perder. Este hace referencia al flujo de caja descontado de la instalación en el que se contemplan los costes iniciales de inversión, los costes de mantenimiento

Tasa interna de retorno (TIR): parámetro que determina si el proyecto es rentable en términos económicos. Si el TIR es alto, se trata de una inversión rentable.

Valor presente: determinada cantidad o inversión nos puede servir para saber la cantidad que debemos ahorrar.

Payback: método de evaluación de inversiones que determina el momento en que se recupera dinero de una inversión. En este se descuenta la inversión inicial a los flujos de caja descontados hasta que se recupera la inversión y en ese año es cuando será el payback descontado.

#### **Parámetros Técnicos**

Exceso energético: Corresponder al porcentaje de electricidad que la instalación produce que no es consumida y que puede ser inyectada a la red en caso de que el sistema este conectado. Si se trabaja en modo isla, se consideraría que son pérdida dado que el sistema tiene la incapacidad de gestionar esta energía producida.

Eficiencia: capacidad de trabajo de un elemento respecto a su capacidad nominal de trabajo

Factor de capacidad: capacidad de aprovechamiento de un elemento en una instalación respecto a su capacidad nominal.

#### **Parámetros medioambientales**

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

En este apartado se van a considerar el impacto ambiental de la instalación así como la reducción de la huella de carbono y el uso del recurso hídrico.

Fracción renovable: Corresponde al porcentaje de la energía consumida por el municipio que será de índole renovable.

Emisiones de CO<sub>2</sub>: son las emisiones provocadas por el abastecimiento energético del municipio en cuestión. Conforme la cantidad de recursos renovables aumenta, la emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen.

### 3.10 CONFIGURACIONES POSIBLES

Para cada escenario se propondrán configuraciones posibles para el abastecimiento energético de este municipio en concreto. Para poder hacer este análisis, se definen distintas variables y tecnologías a emplear dentro del programa Homer. De esta forma se estudiara la viabilidad de todas las opciones posibles y de esta forma ver que configuraciones son las más competentes. Y por lo tanto poder estudiar la situación del hidrógeno como un vector energético y su capacidad de uso.

La metodología empleada para la realización de este proyecto se ha basado en un trabajo previo de análisis de la demanda para el mes de más consumo, la caracterización del recurso solar, y el estudio de la combinación de las posibles tecnologías a emplear con sus respectivos costes.

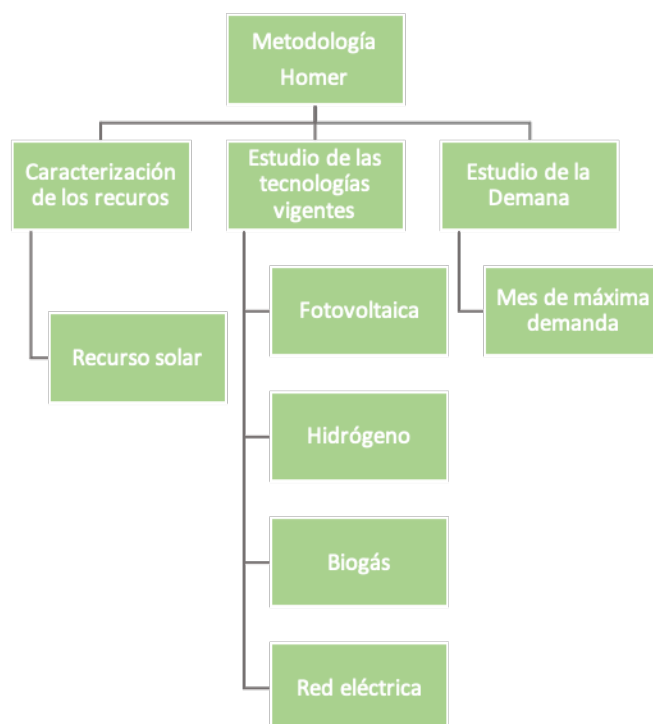


Ilustración 27: Esquema de la metodología empleada. Fuente: elaboración propia.

Para realizar el análisis mediante Homer, se comienza por introducir la demanda eléctrica del municipio a analizar, acto seguido se introduce la ubicación para poder obtener a partir del programa los valores de la radiación solar anual.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

El siguiente paso consiste en configurar la microrred añadiendo las tecnologías que se vayan a utilizar. Para cada uno de los elementos, se deben definir los precios unitarios de instalación, reemplazo y O&M. Por otra parte, introducir los valores de la potencia deseada a instalar.

Una vez se han configurado los elementos referentes a la instalación, se define la conexión a la red eléctrica donde se introducen los valores del precio de compra y venta del kWh, el factor de emisión de CO<sub>2</sub>/kWh que implica el consumo de energía de la Red.

Finalmente, se introducen las restricciones de emisiones, fracción de penetración de energía renovable y la capacidad de abastecimiento.

Una vez se ejecutan el programa, este devuelve los resultados de las mejores opciones según la optimización económica como principal condición a aplicar.

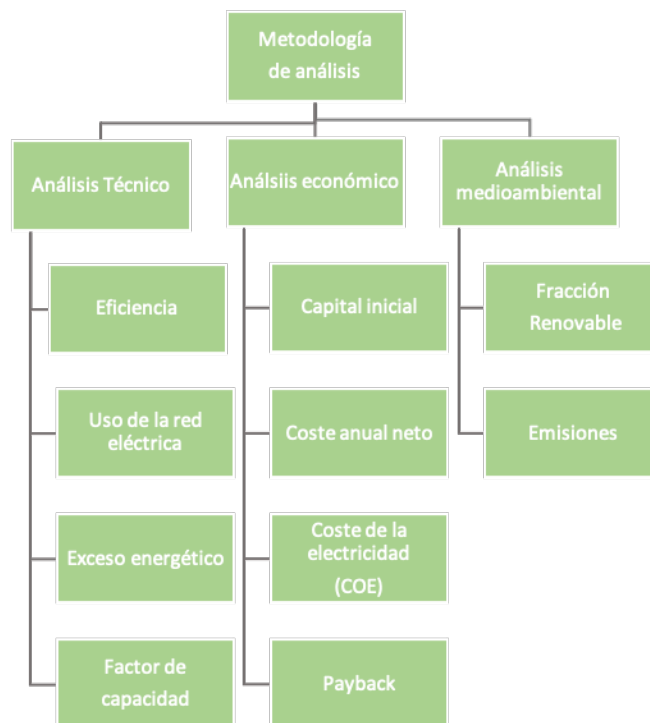


Ilustración 28: metodología de análisis aplicada por Homer. Fuente: elaboración propia

### Escenario 0: Situación actual

La situación actual, hace referencia a la demanda energética por el municipio proporcionada en su totalidad por la red eléctrica. De esta manera se va a estudiar la huella de carbono provocada por el suministro eléctrico de la red, así como el gasto económico anual.

A partir de estos resultados, se estudiarán los distintos casos posibles en base a la situación inicial.

Para determinar los precios de la energía consumida por Ara de los Olmos se ha establecido que el perfil de la demanda es de tipo residencial. Como no se tienen las facturas detalladas de los usuarios y tampoco las potencias contratadas por cada casa, se van a determinar los costes de la energía de manera aproximada.

Como los datos del consumo eléctrico son anteriores a la nueva tarifa de la luz, se aplicaran los costes anteriores, según se han obtenido a partir del BOE, para una tarifa regulada 2.0A

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Precio kWh	0,154712 (€/kWh)
IVA (21%)	0,0324 (€/kWh)
Impuestos sobre electricidad (5,1127%)	0,0079 (€/kWh)
Total	0,195 (€/kWh)
Energía total consumida	1.642.865 (kWh/año)
Coste total	320.358,675 (€)

*Tabla 12: Tarifa regulada 2.0A. Fuente: elaboración propia.*

$$\text{Coste total de la electricidad} = E. \text{ consumida (kWh)} * \text{Total} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right)$$

*Ecuación 10: Coste de la electricidad. Fuente: elaboración propia.*

Este coste total calculado, es un valor orientativo para el conjunto del municipio en el que están censadas 359 personas. Sin embargo la población aumenta durante los meses de verano a causa de las segundas residencias.

El impacto medioambiental de las emisiones generada se calculan a partir de los valores orientativos proporcionados por el IDAE, que aporta un factor aproximado para el mix eléctrico de la red, este se sitúa en 0,6 kgCO<sub>2</sub>/kWh. (IDEA, 2020)

Factor de emisión	0,6 kgCO <sub>2</sub> /kWh
Emisiones provocadas	1.038.291 kgCO <sub>2</sub> /año

Al tratarse de un municipio, no se pueden aplicar las leyes del autoconsumo y por ende la compensación por kWh vertido a la red, por lo que se va a emplear un escenario en el que el municipio figure como un generador de energía para la red a través de una comercializadora como podría ser Som Energía. Así, se podrán pactar unos precios en el que el kWh vertido sea igual que el que se consuma.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

### ESCENARIO 1: FOTOVOLTAICA Y VENTA A LA RED

En este caso, se va a estudiar la implementación de un sistema fotovoltaico conectado a la red, en el que como ya se ha comentado el municipio figurará como un generador para la red eléctrica y de esta manera el conjunto del municipio verá una reducción considerable en su factura de la luz.

Por lo tanto, el precio de compra se estipulará como equivalente al precio de inyección en la red.

Con este sistema de fotovoltaica se espera poder cubrir una gran parte de la demanda eléctrica además de conseguir:

- un beneficio económico
- autoabastecerse mediante energía libre de emisiones
- reducción de la huella de carbono

Una de las ventajas de este tipo de sistema es que no se necesitan equipos de almacenamiento por lo que los cálculos del sistema se reducen de manera considerable, además la eficiencia de este tipología de instalaciones es superior a las que presentan equipos de almacenamiento.

La instalación fotovoltaica estará formada por :

- 890 paneles fotovoltaicos de 400Wp
- 2 inversores de 200kW
- Red eléctrica

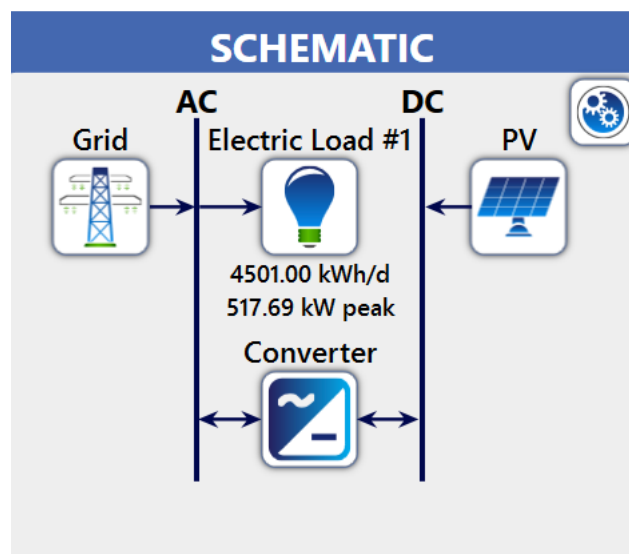


Ilustración 29: Esquema Homer de la configuración solar + red. Fuente: elaboración propia

### Análisis técnico

Se puede observar que la demanda diaria se sitúa en unos 4501 kWh/día. Para modelar el sistema se ha establecido como parámetro una penetración de energía proveniente de carácter renovable del 50%.

En primer lugar, la demanda anual se sitúa en 2.301.215 kWh/año, el componente fotovoltaico tiene un aporte de 1.269.505 kWh/año, de los cuales devierten a la red 594.874 kWh/año. El resto de la demanda eléctrica es cubierta por la red eléctrica.

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

	kWh/año	%
<b>PRODUCCIÓN</b>	1.744.824	100
FOTOVOLTAICA	542.772	31,1
RED	1.202.052	68,9
<b>CONSUMO</b>	1.744.824	100
DEMANDA	1.643.120	95,7
E. VENDIDA	74.168	4,32
<b>EXCESO ENERGÉTICO</b>	0	0
DEMANDA NO CUBIERTA	0	0

Tabla 13: Análisis técnico de la instalación respecto a la producción energética

Se debe constatar que la eficiencia interna de este tipo de configuración es muy elevada dado que hay pocos componentes. Debido a la intervención de pocos dispositivos, las pérdidas energéticas son nulas, por otra parte, todos los excedentes energéticos son inyectados a la red. Por esto mismo, se puede decir que la eficiencia de este sistema es casi del 100% pues no hay casi energía producida que se pierde en todo el conjunto de la instalación.

A continuación se va a evaluar el funcionamiento del sistema fotovoltaico propuesto, mostrando la producción temporal y el resumen del funcionamiento de los módulos.

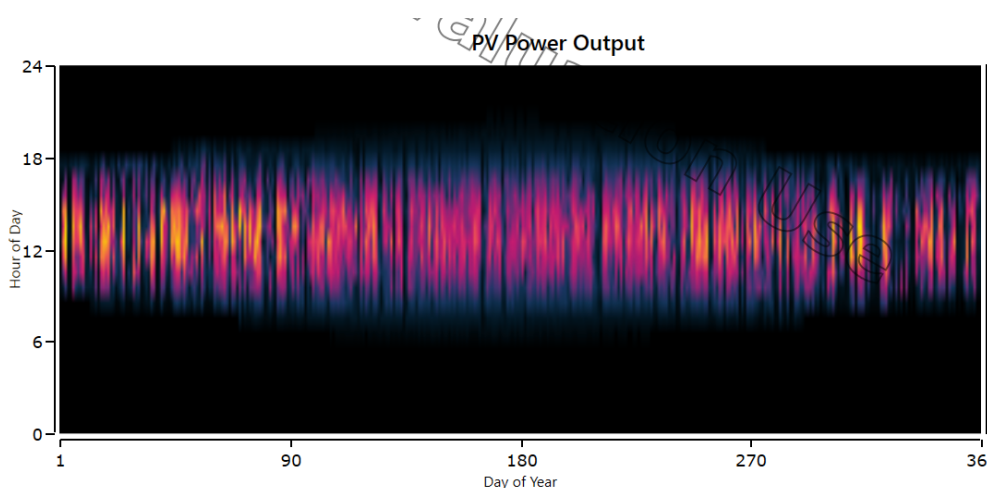


Ilustración 30: distribución temporal de la producción fotovoltaica. Fuente: elaboración propia

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

POTENCIA INSTALADA	356 kW
POTENCIA MEDIA	62 kW
PRODUCCIÓN DIARIA	1487 kWh/d
HORAS DE OPERACIÓN	4.392 h
FACTOR DE CAPACIDAD	16,30%
COSTE DE PRODUCCIÓN	0,0769 €/kWh
PRODUCCIÓN TOTAL	542772 kWh/año

Tabla 14: parámetros técnicos de la instalación fotovoltaica. Fuente: elaboración propia

En la tabla adjunta se puede observar que el factor de capacidad de las placas es de un 16,3%, este valor resulta un poco bajo, esto se debe al rendimiento de los módulos fotovoltaicos y a que las placas solamente funcionan con una capacidad elevada durante las horas centrales del día, concretamente entorno a las 12h00.

También se puede observar que la instalación fotovoltaica trabaja 4.392h/año lo que corresponde alrededor del 50% de las horas anuales, la producción diaria es de 1487 kWh/día lo que suma una producción anual de 1.269.505 kWh/año.

Es importante constatar, que el coste de la energía producida es de 0,0769 €/kWh, lo que implica una reducción de alrededor del 61% del coste respecto de la red de distribución que es de 0,1949€/kWh.

#### Análisis económico

Para poder ejecutar un análisis económico riguroso, se va a efectuar un estudio del flujo de caja, en primer lugar, se descompondrán los costes asociados a la instalación, operación y mantenimiento, así como los costes asociados a estar conectado a la red eléctrica.

Los costes de la instalación se han calculado teniendo en cuenta dentro del precio de kW a instalar, los costes de obra civil y cableado, por ejemplo.



**Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético**

COMPONENTES	Módulos Fotovoltaicos	Inversor	Red Eléctrica	Total (€)
CAPITAL INICIAL (€)	275.010,00	64.000,00	0	339.010,00
REEMPLAZO (€)	0	20.403,67	0	20.403,67
O&M (€)	92.043,92	102.420,13	1.100.637,30	1.295.101,35
CAPITAL NO AMORTIZADO (€)	0	-11.498	0	-11.498
TOTAL DE LA INSTALACIÓN	367.053,92	376.174,98	1.100.637,30	1.843.866,20

*Tabla 15: Flujo de caja de la instalación para 25 años. Fuente: elaboración propia.*

En esta tabla adjunta, se muestran los costes asociados de la instalación para una 25 años de uso. El capital inicial a desempeñar suma un total de 339.010,0€, este corresponde al conjunto de módulos fotovoltaicos (275.010,00€) y los inversores (64.000,00€).

Después se pueden observar que los costes de obra y mantenimiento totales durante la vida del proyecto, ascienden hasta un total de 1.295.101,35€. Por otra parte, los costes de compra de electricidad a la red figuran dentro de esta casilla según Homer, que hace un montante de 1.100.637,30€.

Gracias a estos resultados obtenidos, vamos a poder efectuar un análisis económico con exactitud para determinar la viabilidad del proyecto en términos de: la rentabilidad de la inversión, el plazo de recuperación y el beneficio acumulado.

Como se puede observar, la tasa interna de retorno es de un 20% (TIR), que es un valor muy elevado y por lo tanto es positivo dado que supera la tasa de descuento que se situaba en un 10%. Después aparece el término del Payback en el que la inversión iniciada se recuperará en 5 años aproximadamente, y a partir de ahí se obtiene un saldo positivo respecto a la situación actual. Finalmente, el valor del VAN de la instalación asciende a 533.474,05€

Valor Presente	339.010,00
Beneficio anual	105.786
TIR	20%
Payback	5 años
VAN	533.474,05 €

*Tabla 16: Parámetros económicos de la configuración 1. Fuente: elaboración propia*

A continuación se van a comparar al configuración actual, que hace referencia al municipio que depende de la red en su totalidad, y el sistema actual propuesto de fotovoltaica con conexión a la red. De esta manera, se podrá evaluar la rentabilidad del proyecto.

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

	Capital Inicial (€)	Coste Electricidad (COE) (€/kWh)
Situación Actual	0	0,1949
Fotovoltaica + Red	339.010,00	0,0947

Tabla 17: comparativa entre el escenario actual, y la configuración de fotovoltaica. Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver, esta simulación es de gran interés pues

### Análisis medioambiental

En este apartado, se muestran las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes que produce el sistema. Por lo tanto, se detallará con exactitud las emisiones asociadas a la compra de energía eléctrica proveniente de la red, y por otra parte, se reflejará la reducción de emisiones gracias a penetración de la producción fotovoltaica en el sistema mediante la reducción de la dependencia energética de la red

	Emisiones kg CO <sub>2</sub> /año
Situación Actual	1.038.291
Escenario: Foto + Red	759.697
Emisiones evitadas	278.594
Reducción (%)	26,83
Fracción renovable	30,00%

Tabla 18: comparación del impacto ambiental

Como se puede observar en la tabla adjunta, las emisiones generadas de esta configuración son de 759.697 kg/año frente a 1.038.291 kg/año emitidos por la situación actual. Esto se traduce en una reducción del 26,83% de emisiones de CO<sub>2</sub> anualmente.

### ESCENARIO 2: FOTVOLTAICA + HIDROGENO + VENTA

A continuación, se va a proponer el siguiente sistema que se caracteriza por la producción de hidrógeno como vector energético. Este tipo de sistemas están en fases de desarrollo debido a la poca rentabilidad económica del hidrógeno actualmente. De hecho, la implementación de los sistemas de hidrogeno en micro-redes sigue en vías de desarrollo y se espera que en el futuro sea rentable económicamente, puesto que el sistema de producción fotovoltaica conectado a la red, sigue siendo el más atractivo.

Sin embargo, cabe constatar que su análisis en sistemas híbridos de energía renovable conectados a la red es de gran interés para saber como se comporta una instalación de dichas características. Como ya se ha comentado anteriormente en el marco teórico, un sistema de producción de hidrógeno funciona a partir de un electrolizador, que genera

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

hidrógeno a partir de la hidrólisis del agua, en el que se genera hidrógeno y oxígeno de alta pureza. Para su almacenamiento, el hidrógeno es almacenado en tanques a alta presión, este se usa para alimentar la pila de combustible, producción electricidad a partir del hidrógeno, y como subproducto se produce agua. Este funciona en el momento en el que los módulos fotovoltaicos no sean capaz de alimentar de alimentar la demanda eléctrica.

El principal interés de analizar la posibilidad de la implementación de un sistema de estas características viene dado por la necesidad de acelerar la transición energética hacia un paradigma mas limpio y poder cumplir los objetivos de Net Zero para 2050, esto se basa en el desarrollo de comunidades energéticas o la estimulación del autoconsumo por parte de conglomerados pequeños de urbanizaciones de vecinos, son uno de los ejemplos de vital importancia para cumplir estos objetivos. Por otra parte, la implementación de un sistema de estas características, permite ayudar a evitar sobrecargas en la red.

El sistema a estudiar esta compuesto por:

- 890 placas de 400Wp, lo que hace un total de 356 kW
- 2 inversores de 200 kW que implica un total de 400 kW
- Electrolizador de tecnología PEM de
- Tanque de hidrógeno de 5 kg a 20 bar de presión
- Pila de combustible de tecnología PEMFC
- Red

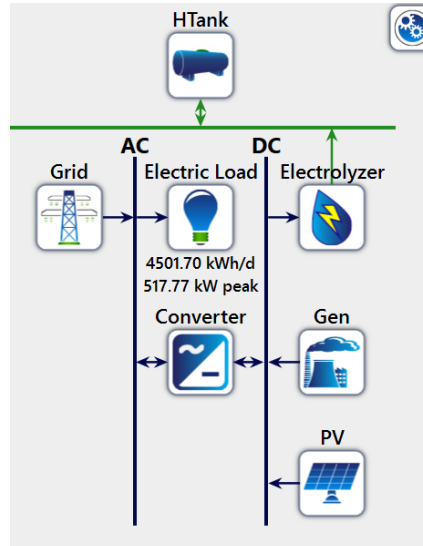


Ilustración 31: Esquema eléctrico en Homer. Fuente: elaboración propia

### **Análisis técnico**

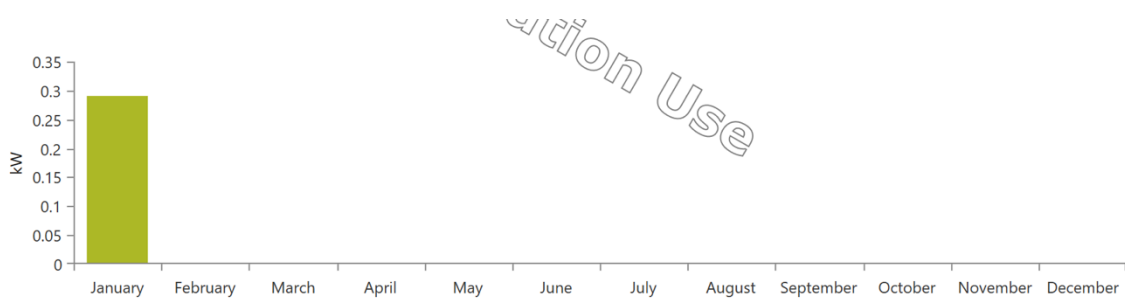
El análisis técnico va a comenzar analizando el comportamiento eléctrico de este sistema, la producción fotovoltaica se sitúa en 542.772 kWh/año, en el que el 468.604 kWh/año alimentan directamente a la demanda, 74.168 kWh/año son inyectados a la red, y alrededor de 0 kWh/año son empleados para alimentar al electrolizador.

**Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético**

De hecho, la demanda del municipio es de 1.744.824 kWh/año, que es abastecida solamente por la red, que aporta 1.202.052 kWh/año, y por la fotovoltaica, de la cual proceden 542.772 kWh/año.

	kWh/año	%
<b>PRODUCCIÓN</b>	<b>1.744.824</b>	<b>100</b>
FOTOVOLTAICA	542.772	31,1
PILA DE COMBUSTIBLE	0	0
RED	1.202.052	68,9
<b>CONSUMO</b>		
DEMANDA	1.643.120	95,7
E. VENDIDA	74.168	4,32
<b>EXCESO ENERGÉTICO</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
DEMANDA NO CUBIERTA	0	0

Como se puede ver en la figura adjunta, el funcionamiento del electrolizador es casi nulo, y su producción también. De hecho, su producción anual se sitúa solamente en 9,00 kg/año por lo que su factor de capacidad es el 0%.



*Ilustración 32: Producción de hidrógeno del electrolizador. Fuente: Elaboración propia*

Esto se debe al gran coste energético y económico que supone la producción de hidrógeno y por lo tanto el programa Homer lo ha descartado pues no es viable en términos económicos, además de su elevado coste por precio unitario. Este software se basa en la optimización de los componentes para el dimensionamiento de una instalación eléctrica. Debido a que la producción de hidrógeno en la actualidad es muy costosa, el programa lo ha descartado como una opción viable pues sale más económico inyectar y vender la energía sobrante de los módulos fotovoltaicos que emplearla para la producción de hidrógeno.

Como consecuencia de los resultados obtenidos, esta opción está lejos de ser viable, pues saldría más rentable realizar una instalación de fotovoltaica y vender energía a la red.

El motivo principal por el que el hidrógeno no presenta ninguna influencia en este estudio es a causa de que en instalaciones medianas que requieren una potencia elevada a ser satisfecha, la

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

electrólisis del agua está lejos de ser rentable. Sin embargo, en el ámbito residencial para una instalación que requiera una potencia más pequeña, sí que sería interesante estudiar la implementación del hidrógeno dado que tendría una mayor capacidad de uso.

A nivel técnico, no se puede hacer un análisis más exhaustivo debido a los resultados obtenidos, pues a grosso modo, son los mismos que los obtenidos para el escenario uno.

Por otra parte, se debe constatar que no se va a realizar el análisis económico en vista de los resultados pues se debe realizar una inversión en unos equipos que no van a tener uso alguno. Por este motivo, se ha descartado.

### **Análisis medioambiental**

A nivel medioambiental, las emisiones evitadas son las mismas que con el sistema de fotovoltaica únicamente.

	Emisiones kg CO <sub>2</sub> /año
Situación Actual	1.038.291
Escenario: Foto + Red + H <sub>2</sub>	759.697
Emisiones evitadas	278.594
Reducción (%)	26,83
Fracción renovable	30,00%

*Tabla 19: Análisis medioambiental. Fuente: elaboración propia*

### **ESCENARIO 3: MODO ISLA**

En este apartado en modo isla, se va a estudiar la posibilidad de estar desconectado de la red y cubrir la totalidad de la demanda energética mediante la combinación de tres tecnologías renovables: fotovoltaica, generador de biogás e hidrógeno.

En vista de los precios actuales y de la imposibilidad de estar desconectado de la red, se va a simular este escenario para a partir del año 2030 cuando haya un abaratamiento de la tecnología del hidrógeno y posiblemente exista un conjunto de leyes que contemplen la posibilidad de operar al margen de la red eléctrica.

Para abordar la problemática del hidrógeno, se han utilizado como referencia un artículo publicado por IEA ( International Energy Agency) llamado: "The future of Hydrogen", en el que se presentan el futuro de esta tecnología en cuanto a su implementación en los sistemas de generación de energía. También se ha hecho uso de un artículo académico propuesto por "The international Journal of Hydrogen", que aporta con más exactitud el futuro coste de la tecnología del hidrógeno. (O.Schmidt, A. G, 2017).

Este artículo, aporta una información muy detallada sobre la previsión de los futuros costes, eficiencia y vida útil de las tecnologías de electrólisis y pilas de combustible.

Los datos que se van a presentar a continuación están proporcionados en base a las opiniones presentadas por expertos en la industria y en el ámbito académico, que ofrecen una estimación de los costes futuros del hidrógeno.

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Estos datos están clasificados según si los precios de los electrolizadores aumentan (RD&D) o disminuyen (R&D). Debido a la importancia que va a jugar el hidrógeno para alcanzar la transición energética y las grandes inversiones que ya están realizando grandes empresas en abaratar los costes de esta tecnología, se tomaran como referencia los valores los valores medios que se esperan a partir del año 2030, estos están alrededor de 600€/kW, aunque según este estudio, los valores más bajos se sitúan en alrededor de 280€/kW. En la figura adjunta, se pueden observar las estimaciones que han proporcionado estos expertos.

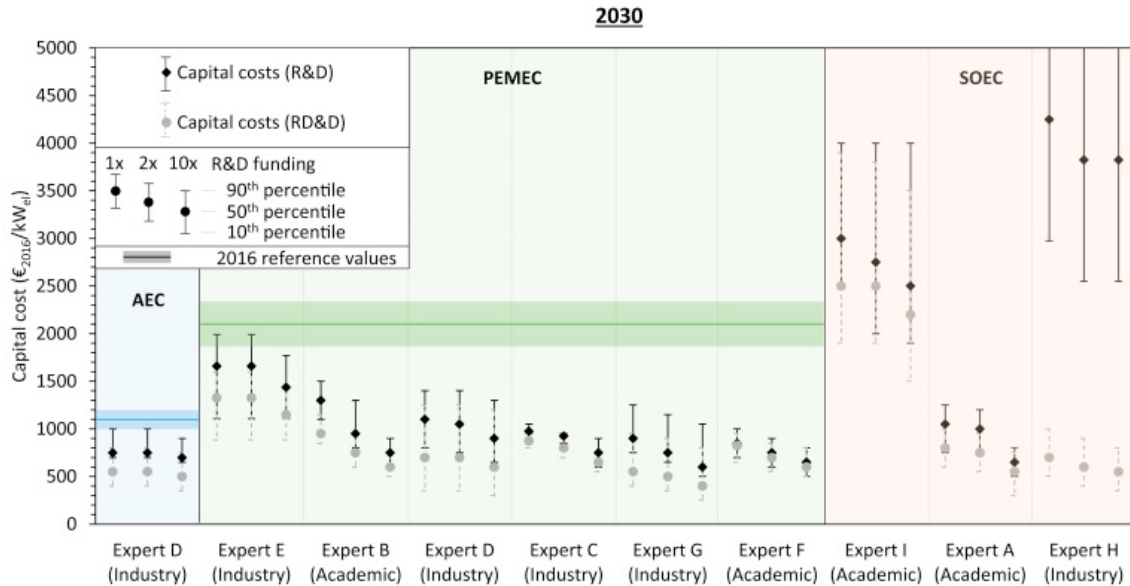


Ilustración 33: Previsión de costes de la electrólisis. Fuente: *International journal of hydrogen energy*

Por otra parte, un factor clave en el desarrollo de la tecnología del hidrógeno es alcanzar una mejora sustancial en las horas de vida y la eficiencia. Para el año 2030, se estima que la eficiencia de los electrolizadores alcanzará un 80% en el mejor de los casos, por el contrario en el peor de los casos el esta no aumentaría. En definitiva, como se puede apreciar en la figura adjunta, la eficiencia media que se espera estará alrededor del 75%.

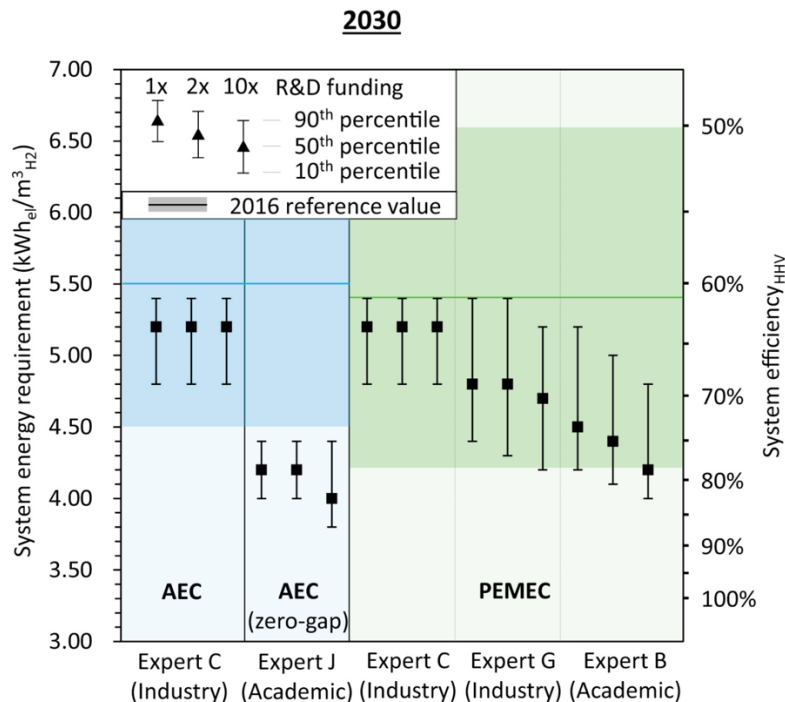
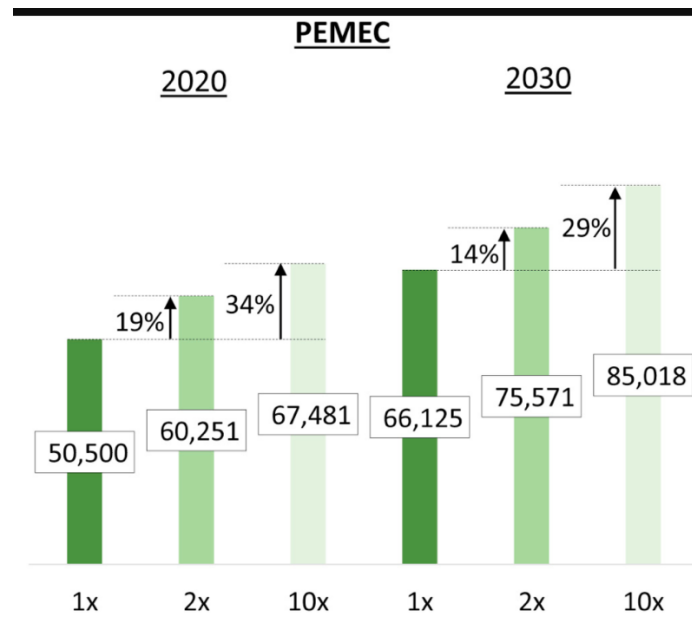


Ilustración 34: Previsión de la eficiencia de la electrólisis. Fuente: *international journal of hydrogen energy*

**Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético**

La vida útil de estos equipos para el año 2030, se espera que se situe entre 66.000 h y 85.000h, concretamente el escenario mas prometedor esta en 75.500h, esta información se puede observar en la figura adjunta.



*Ilustración 35: Previsión de la vida útil de los electrolizadores alcalinos. Fuente: international hydrogen of energy*

En la siguiente tabla, se muestran los costes unitarios del hidrógeno:

	Inversión	Reemplazo	O&M	Eficiencia	Vida útil
Electrolizador	600 €/kW	170 €/kW	30 €/año	75%	80.000 hr
Pila de combustible	600 €/kW	170 €/kW	0.003 €/hr	75%	80.000 hr
Tanque de hidrógeno	800 €/kg	800 €/kg	200 €/año		25 años

*Tabla 20: costes unitarios del hidrógeno*

El objetivo de esta simulación consiste en estudiar la posibilidad de que este municipio pueda ser energéticamente auto-suficiente. Para poder estudiar este escenario se ha hecho uso de un generador de biogás a partir de biomasa, un sistema de fotovoltaica y un sistema de apoyo basado en hidrógeno.

**Análisis técnico**

El objetivo de esta simulación consiste en estudiar la posibilidad de que este municipio pueda ser energéticamente auto-suficiente. Para poder estudiar este escenario se ha hecho uso de un

**Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético**

generador de biogás a partir de biomasa, un sistema de fotovoltaica y un sistema de apoyo basado en hidrógeno.

En la tabla 21, se pueden observar los datos de consumo y producción eléctrica. Como se puede observar, el hidrógeno sigue sin jugar un papel importante en el conjunto de la instalación.

	kWh/año	%
<b>PRODUCCIÓN</b>	1.797.725	100
FOTOVOLTAICA	507.802	28,2
BIOGAS	1.253.736	69,7
PILA DE COMBUSTIBLE	36.187	2,01
<b>CONSUMO</b>	1.767.670	100
DEMANDA	1.767.670	100
E. VENDIDA	0	0
<b>EXCESO ENERGÉTICO</b>	11.067	0,616
DEMANDA NO CUBIERTA	28.844	1,76

*Tabla 21: Producción y consumo energético en modo isla. Fuente: elaboración propia*

Por otra parte, es el generador de biogás que presenta un mayor aporte a la instalación debido a su capacidad de poder satisfacer la demanda eléctrica pues no sufre ninguna intermitencia debido a las horas de sol como para con la tecnología fotovoltaica. También se puede observar que el exceso energético es muy bajo situándose en 11.067 kWh/año y la demanda no cubierta es 28.844 kWh/año.



Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

	FOTOVOLTAICA	BIOGAS	ELECTROLIZADOR	PILA DE COMBUSTIBLE
POTENCIA INSTALADA	356 kW	260 kW	160 kW	350 kW
POTENCIA MEDIA	58 kW	148 kW	17,5 kW	94,7 kW
PRODUCCIÓN DIARIA	1391 kWh/d	3435 kWh/d	420,95 kWh	99,14 kWh/d
HORAS DE OPERACIÓN	4.392 h/año	8479 h/año	2777 h/año	382 h/año
FACTOR DE CAPACIDAD	16,30%	55%	11%	1,18%
PRODUCCIÓN TOTAL	507.802 kWh/año	1.253.736 kWh/año	153.649 kWh/año	36.187
COSTE FIJO DE GENERACIÓN	0,0524 €/h	21,2 €/h		22.2 €/h

Tabla 22: parámetros de funcionamiento de la instalación. Fuente: elaboración propia

Para hacer el análisis técnico, se va a optar por analizar el mes de máxima demanda, siendo este el mes de agosto. En la figura adjunta, se muestran los rangos de funcionamiento para la tercera semana de agosto.

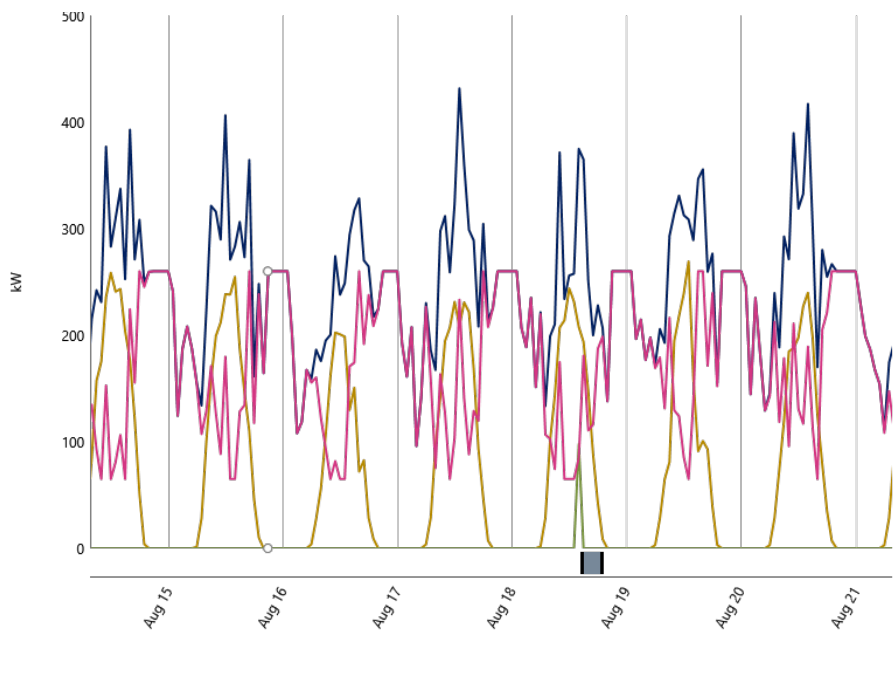


Ilustración 36: Funcionamiento detallado de la configuración en modo isla. Fuente: elaboración propia

Se puede observar que casi la totalidad de la demanda durante esa semana es cubierta por la fotovoltaica y el generador de biogás, de hecho, el sistema de hidrógeno solamente sirve apoyo para compensar pequeños picos de la demanda (línea de color verde).

Como se puede ver, durante las horas de sol, la producción fotovoltaica (línea de color ámbar) juega un papel mas importante que el generador de biogás (línea de color rosa).

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

La producción de electricidad a partir del generador aumenta cuando se acerca la noche, aunque siempre mantiene una potencia mínima de 65 kW para ayudar a la fotovoltaica a satisfacer la demanda.

Por otra parte, no se producen ningún exceso de producción pero, si que se consigue satisfacer la totalidad de la demanda.

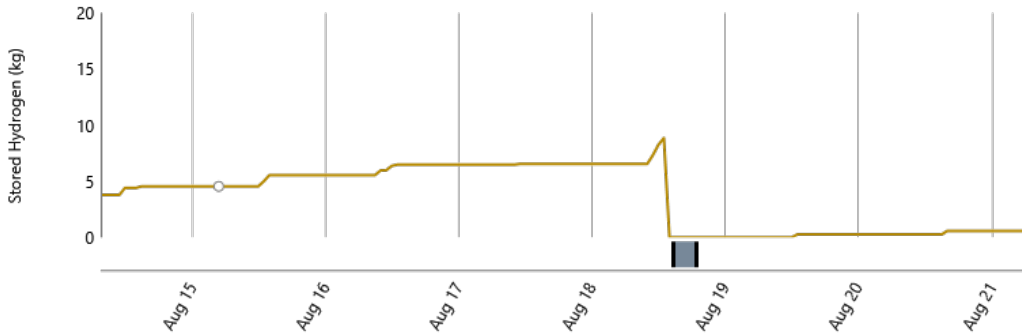


Ilustración 37: Nivel del tanque de hidrógeno

Por último, se puede ver la evolución del tanque de hidrógeno durante dicho intervalo de tiempo, la producción de hidrógeno mantiene un ritmo constante pero no muy elevada llegando a los 10kg de hidrógeno almacenado, y una vez se produce el pico, el nivel del tanque baja en picado hasta los 0kg, cuando la producción vuelve a aumentar lentamente.

### **Análisis económico**

El siguiente análisis económico, empieza por mostrar el flujo de caja descontado para la duración del proyecto. La inversión inicial del proyecto, asciende a un capital de 847.525,0€. El desglose de esta inversión consta de 275.010 € correspondientes a los módulos fotovoltaicos, 64.000€ al inversor fotovoltaico, 214.600€ al generador de biogás, 6400 € al tanque de hidrógeno, 48.000€ al tanque de hidrógeno y 175.000€ a la pila de combustible.

**Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético**

COMPONENTES	CAPITAL INICIAL (€)	REEMPLAZO (€)	O&M (€)	COMBUSTIBLE (€)	CAPITAL NO AMORTIZADO (€)	TOTAL DE LA INSTALACIÓN (€)
Módulos Fotovoltaicos	275.010,00	0	92.043,92	0,00	0	367.053,92
Inversor	64.000,00	20.403,67	102.420,13	0,00	-11.498	376.174,98
Generador de Biogás	214.760	1.528.308,11	569.984,55	1.049.683,76	-44.673,53	3.318.062,89
Tanque de Hidrogeno	6400	20.403,67	4.136,81	0,00	0	10.536,81
Electrolizador	48.000	0	31.026	0	0	79.026,04
Pila de Combustible	175.000	0	51.827,27	0,00	-15.231,89	211.620,38
<b>Total (€)</b>	<b>847.525,00</b>	<b>51,009.18</b>	<b>1.718.418,58</b>	<b>0,00</b>	<b>-28,74694</b>	<b>4.162.626,06</b>

*Tabla 23: Flujo de caja para 25 años. Fuente: elaboración propia*

Por otro lado, los costes de mantenimiento del conjunto de la instalación, ascienden a 1.718.418,58€ durante la vida útil de la instalación.

A continuación, se van amostrar los parámetros del COE y el coste anual en la tabla 23.

Coste Electricidad (COE)	0.1995 (€)
Coste Anual	261.461,20 (€)

*Tabla 24: Coste de la electricidad y gastos anuales. Fuente: elaboración propia.*

En base a los resultados técnicos, se ha se ha realizado el siguiente análisis económico que se puede observar en la tabla 14.

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Valor Presente	783.170,00
Beneficio anual	58.897,48
TIR	-1%
Payback Simple	15 años
VAN	2.907.908,51 €

Tabla 25: Resultados económicos de la configuración en modo isla. Fuente: elaboración propia

En vista a los resultados obtenidos, se puede estimar que esta opción es muy interesante desde el punto de vista económico pues se tiene un VAN bastante elevado por lo que es una opción muy interesante. Además el TIR se sitúa en -1% por lo que si se consiguiese hacer uso de alguna de las subvenciones propuestas anteriormente, se tendría un resultado positivo. Además como se puede observar, el coste de la electricidad es el mismo que se pagaría al estar conectado a la red con una tarifa eléctrica de carácter regulado.

	Capital Inicial (€)	Coste Electricidad (COE) (€/kWh)
Situación Actual	0	0,1949
Fotovoltaica + Red	1.262.799,49	0,0947
Modo Isla	847.525,00	0.1995

Tabla 26: Comparativa de costes entre los distintos escenarios. Fuente: elaboración propia.

Sin duda, esta opción es la que más convendría la municipio en el futuro cuando se establezca una regulación que permita desconectarse de la red, se debería volver a estudiar la viabilidad de ejecutar este proyecto.

### **Análisis medioambiental**

Por último, se debe tener en cuenta que gracias a la implementación de un sistema de generación de carácter renovable, se llega a reducir el 100% de las emisiones que se generaban al estar conectados a la red.

	Emisiones kg CO2/año
Situación Actual	1.038.291
Escenario: Foto + Red	0
Emisiones evitadas	1.038.291
Reducción (%)	100,00
Fracción renovable	100,00%

Tabla 27: Emisiones de la configuración en modo isla. Fuente: elaboración propia

Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

Desde el punto de vista medioambiental, esta opción resulta muy interesante.

Por último decir, que este modelo de abastecimiento energético es una de las alternativas posibles a poder asegurar la transición energética si se consigues la soberanía energética de pequeños emplazamientos que requieran una potencia que se pueda suministrar de manera independiente. Así se permitiría hacer uso de la revalorización energética de la biomasa y reducir al cien por cien las emisiones de gases de efecto invernadero.

## **CAPÍTULO 3. CONCLUSIONES**

En el presente trabajo se ha estudiado como un municipio podría ayudar a reducir la dependencia de la red eléctrica y por lo tanto la reducción del consumo de combustibles fósiles.

Este estudio ha analizado la posibilidad de incorporar el hidrógeno como vector energético a un sistema híbrido para almacenar energía limpia, sin embargo, la viabilidad del uso del hidrógeno para su incorporación a este tipo de sistemas esta muy lejos de ser rentable. Esto se debe al carácter de la instalación que requiere una gran potencia a instalar. Por otra parte, cabe constatar que el hidrógeno tiene un fuerte potencial de uso para instalaciones de carácter residencial que consuman pocos kilovatios.

Como se ha podido comprobar, la integración de fotovoltaica va a seguir siendo la opción mas rentable en cuanto se refiere a la producción de energía de carácter renovable. También se ha podido observar que la integración de un generador de biogás es la opción mas viable frente al hidrógeno debido al bajo coste de la biomasa y que no presenta ninguna intermitencia como puede ocurrir con la energía solar.

Es importante remarcar, que pese a que se haya visto que el hidrógeno no es una opción viable, la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles, permite alcanzar una mejora no solamente a nivel económico, sino también a nivel social y ambiental. Por este motivo, es muy importante para un país como España puesto que no dispone de combustibles fósiles, pero dispone de un gran número de horas de sol al año, la energía más potente que se conoce.

Por lo tanto, se puede concluir este trabajo afirmando el papel de vital importancia que desempeñaran los ingenieros del futuro en contribuir a alcanzar los objetivos 2050. Gracias a el conocimiento aprendido durante estos años, se tienen todas las herramientas posibles en esforzarse en revertir el cambio climático. Alcanzar una sociedad que sea más verde, permitirá alcanzar un mundo mas respetuoso con el medioambiente y todas las especies que habitan el globo. Además, si los países del hemisferio norte alcanzan un desarrollo más ético, permitirá a países en vías de desarrollo en adoptar modelos de carácter circular y verde.

## **BIBLIOGRAFÍA**

BID, Marzo 2017. Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos urbanos.

IEA, 2020. Producción fotovoltaica mundial en un escenario de desarrollo sostenible, 2000-2030

The Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, 2012. Hydrogen Storage

BERTUCCIOLI, L. C. (2014). *Study on development of water electrolysis in EU*.

R.M Navarro (2015). Introducción to Hydrogen Production. *www.sciencedirect.com*

IDAE. (2011). *PLAN DE ENERGÍAS RENOVABLES 2011-2020*. MADRID.

IVACE (2020). Ayudas destinadas al fomento de instalaciones de autoconsumo eléctrico para empresas y entidades 2021

IDAE (2020). Instrucciones de uso de la calculadora de huella de carbono de organización alcance. 1+2

O.Schmidt, A. G. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International journal of hydrogen energy*, 30470-30492.

Alberto Rodríguez Bachiller (2012). Tecnología del Hidrógeno y Pilas de Combustible

## **PRESUPUESTO**



Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del  
 municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

## PRESUPUESTO

CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS				
Nº	Código	Ud	Descripción	Total
<b>1 Estudio de las Tecnologías</b>				
1.1		<b>h</b>	<b>Busqueda y recopilación de información</b>	
	U.1.01	20,00 h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35 700
			<b>Precio total por h</b>	700
				<b>Son setecientos Euros</b>
1.2		<b>h</b>	<b>Análisis de la información</b>	
	U.1.02	20,00 h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35 700
			<b>Precio total por h</b>	700
				<b>Son setecientos Euros</b>
1.3		<b>h</b>	<b>Redacción y Edición de Textos</b>	
	U.1.03	20,00 h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35 700
			<b>Precio total por h</b>	700
				<b>Son setecientos y pico Euros</b>

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

### CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

Nº	Código	Ud	Descripción	Total
<b>2 Análisis de la Demanda y Recurso solar</b>				
2.1		<b>h</b>	<b>Obtención de la curva y modelado</b>	
	U.2.01	4,00 h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      140
			<b>Precio total por h</b> .....	140
<b>Son cientocuarenta Euros</b>				
2.2		<b>h</b>	<b>Estudio de la Demanda</b>	
	U.2.02	8,00 h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      280
			<b>Precio total por h</b> .....	280
<b>Son doscientos ochenta y pico Euros</b>				
2.3		<b>h</b>	<b>Caracterización del recurso solar con PVGIS</b>	
	U.2.03	6,00h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      210
			<b>Precio total por h</b> .....	210
<b>Son doscientos diez Euros</b>				
2.4		<b>h</b>	<b>Redacción y Edición de Textos</b>	
	U.2.04	7,00h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      245
			<b>Precio total por h</b> .....	245
<b>Son setecientos cuarenta y cinco Euros</b>				

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

### CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

Nº	Código	Ud	Descripción	Total
<b>3 Dimensionado y Selección de equipos</b>				
3.1		h	<b>Búsqueda de equipamientos en internet</b>	
	U.3.01	6,00 h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      210
			<b>Precio total por h</b> .....	210
				<b>Son coscientos diez Euros</b>
3.2		h	<b>Selección de los Equipos</b>	
	U.3.02	8,00 h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      280
			<b>Precio total por h</b> .....	280
				<b>Son doscientos ochenta Euros</b>
3.3		h	<b>Dimensionado de la instalación</b>	
	U.3.03	20,00h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      700
			<b>Precio total por h</b> .....	700
				<b>Son setecientos Euros</b>
3.4		h	<b>Redacción y Edición de Textos</b>	
	U.3.04	11,00h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      385
			<b>Precio total por h</b> .....	385
				<b>Son trescientos ochenta y cinco Euros</b>

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

### CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

Nº	Código	Ud	Descripción	Total
<b>4 Análisis Tecno-Económico</b>				
4.1		<b>h</b>	<b>Estudio y cálculo de costes</b>	
	U.4.01	20,00 h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      700
			<b>Precio total por h</b> .....	700
				<b>Son setecientos diez Euros</b>
4.2		<b>h</b>	<b>Planteamiento de las configuraciones</b>	
	U.4.02	20,00 h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      700
			<b>Precio total por h</b> .....	700
				<b>Son setecientos Euros</b>
4.3		<b>h</b>	<b>Uso de la herramienta Homer</b>	
	U.4.03	25,00h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      875
			<b>Precio total por h</b> .....	875
				<b>Son ochocientos setenta y cinco Euros</b>
4.4		<b>h</b>	<b>Redacción y Edición de Textos</b>	
	U.4.04	18,00h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      630
			<b>Precio total por h</b> .....	630
				<b>Son seiscientos treinta Euros</b>

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

### CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

Nº	Código	Ud	Descripción	Total
<b>5 Análisis de los resultados</b>				
5.1		<b>h</b>	<b>Análisis de Resultados</b>	
	U.5.01	35,00 h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      1225
			<b>Precio total por h</b>	1225
<b>Son mil doscientos veinte y cinco</b>				
5.2		<b>h</b>	<b>Estudio de la viabilidad</b>	
	U.5.02	20,00 h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      700
			<b>Precio total por h</b>	700
<b>Son setecientos Euros</b>				
5.3		<b>h</b>	<b>Redacción y Edición de Textos</b>	
	U.5.03	27,00h	Graduado en Ingeniería de la Energía	35                      945
			<b>Precio total por h</b>	945
<b>Son seiscientos treinta Euros</b>				

## Estudio de la viabilidad de abastecimiento energético del municipio Aras de los Olmos con generación de hidrógeno como vector energético

---

Proyecto: PRESUPUESTO TFG

### **Apartados**

---

1. Estudio de las tecnologías	2100
2. Análisis de la Demanda y Recurso solar	875
3. Dimensionado y Selección de equipos	1575
4. Análisis Tecno-Económico	2905
5. Análisis de los resultados	2870
<hr/>	
Presupuesto de ejecución material	10325
13% de gastos generales	1342,25
6% de beneficio industrial	619,5
SUMA	12286,75
21% IVA	5160,435
<hr/>	
PRESUPUESTO DEL PROYECTO	17447,19

El presente presupuesto de ejecución asciende a a la cantidad de  
DIECISIETE MIL CUATROCIENTOS CUARENTA Y SIETE EUROS CON 18 CENTIMOS